

电极电压对碳纳米管阴极电离规性能影响的数值模拟*

张虎忠¹⁾²⁾ 李得天^{1)2)†} 董长昆^{1)2)‡} 成永军¹⁾ 肖玉华¹⁾

1) (兰州物理研究所真空低温技术与物理重点实验室, 兰州 730000)

2) (温州大学微纳结构与光电器件研究所, 温州 325000)

(2012年9月26日收到; 2013年1月10日收到修改稿)

本文基于 IE514 分离规结构, 建立了碳纳米管阴极电离规物理模型, 根据电离规标准方程, 利用离子光学模拟软件 SIMION 8.0 分别研究了电极电压对灵敏度和 I_{grid}/I_e 的影响. 结果表明, 随着阳极/门极电压比值增大 ($V_{\text{grid}}/V_{\text{gate}}$), I_{grid}/I_e 也将增大, 然而, 当阳极电压增大时, 会导致灵敏度降低, 进而影响真空测量下限的延伸; 该模拟结果与相关文献报道的实验结果符合性很好. 因此, 选择合适的电极电压, 将有利于提高灵敏度, 增大阳极电流, 进一步延伸真空测量下限. 本文所采用的数值模拟方法可推广应用于各种新型碳纳米管阴极极高真空电离规的研发和理论分析中, 为解决极高真空测量难题提供了有效的研究途径.

关键词: 碳纳米管阴极电离规, 电极电压, 灵敏度, 阳极电流

PACS: 07.30.Dz, 07.56.-e, 02.60.Cb

DOI: 10.7498/aps.62.110703

1 引言

应用碳纳米管 (carbon nanotube, CNT) 场发射电子技术的电离规是解决极高真空测量难题的有效技术手段^[1-3]. 近十年来, CNT 阴极电离规受到了国内外的广泛关注, 许多学者先后将 CNT 阴极应用到不同类型的电离规中, 开展了相关的研究工作^[4-14], 并针对电极电压与电离规工作性能的相互关系进行了实验研究. Dong 和 Myneni^[4,5] 将 CNT 阴极应用于分离规中, 实验研究了阳极电压和门极电压对电子透过率以及阳极电流的影响, 测得该电离规灵敏度为 0.03 Pa^{-1} , 真空测量下限为 10^{-8} Pa ; Sheng 等^[6] 将 CNT 阴极应用于鞍场规, 研究了阳极电压和灵敏度的相互关系, 实验测得该电离规具有较高的灵敏度 (1.7 Pa^{-1}), 但是受限于 CNT 阴极发射电流的稳定性差, 其测量下限只达到 $3 \times 10^{-5} \text{ Pa}$; Huang^[8], Suto^[9], Knapp^[12], Liu 等^[14] 先后将 CNT

阴极应用到 B-A 规中, 实验研究了电极电压对电离规的性能影响, 其中, Huang、Liu 等针对门极处电子透过率与电极电压的相互关系进行了研究, 该规型的 CNT 阴极电离规所能达到的最大灵敏度为 0.15 Pa^{-1} , 测量下限最低为 10^{-7} Pa ^[12]. 综合分析国内外研究结果表明, 目前 CNT 阴极电离规普遍存在灵敏度低和测量下限不能满足应用要求等问题, 而研究电极电压和规管结构对 CNT 阴极电离规性能的影响, 是解决以上问题、提高 CNT 阴极电离规性能的关键因素.

目前针对电极电压对 CNT 阴极电离规性能影响的分析主要采用实验研究手段, 应用数值模拟研究的方法很少; 而对于实验研究中采用的各种规型而言, 只有分离规能够很好地抑制软 X 射线效应 (电子撞击电极时产生软 X 射线, 软 X 光子照射离子收集极, 发生光电子发射, 产生正离子流, 导致收集极接收气相离子流时存在本底干扰) 和电子激励脱附 (ESD) 效应 (当电子收集极表面吸附一层

* 国家杰出青年科学基金 (批准号: 61125101) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: lidetian@hotmail.com

‡ 通讯作者. E-mail: dck@wzu.edu.cn

化学活性气体 (如 O₂, H₂, H₂O, CO 等) 时, 受到电子碰撞, 解吸出正离子和中性分子等, 造成电离规的测量误差^[3], 因而基于分离规结构的 CNT 阴极电离规也是目前为止实现测量下限最低的规型^[4]. 因此, 本文基于 IE514 分离规结构, 建立 CNT 阴极电离规计算模型, 采用离子光学模拟软件 SIMION 8.0^[15] 和自编程序, 通过计算电离规中的电场分布和电子、离子运动轨迹, 研究了电极电压对灵敏度影响; 通过分析门极处电子透过率 (transmission ratio) 和电离规中电子逃逸率 (escaped ratio), 研究了电极电压对阳极电流与阴极发射电流比值 (I_{grid}/I_e) 的影响.

2 计算模型与分析方法

基于 IE514 分离规结构的 CNT 阴极电离规为

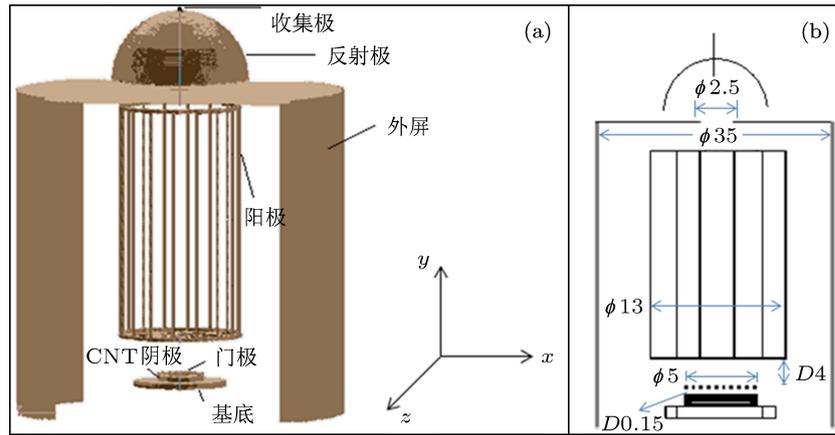


图 1 (a) CNT 阴极电离规三维物理模型 (剖面图); (b) 电极相对位置示意图

根据电离规工作原理, 其对气体压力的测量和标定是通过探测微电流信号来实现的, 具体表达式为

$$I_+ = I_- NL\sigma = I_- \frac{L\sigma}{kT} P. \quad (1)$$

电离规标准方程:

$$I_+ = I_- SP. \quad (2)$$

结合 (1) 和 (2) 式, 推导得出电离规灵敏度定义式如下:

$$S = \frac{L\sigma}{kT}. \quad (3)$$

在 (1), (2), (3) 式中, P 表示环境被测压力, L 表示电子运动轨迹长度, k 是波尔兹曼常数, T 表示绝对温

轴对称结构, 其电极结构主要包括 CNT 阴极、门极、阳极、外屏、反射极和收集极, 其三维结构模型和电极相对位置如图 1 所示. CNT 阴极是直径 5 mm 的圆盘结构, 对应门极栅网直径 5 mm, 透明度 67%, 阳极栅网直径 3 mm, 收集孔直径 2.5 mm, 外屏直径 35 mm, 门极与阴极间距 150 μm , 阳极栅网顶部距离门极栅网表面 4 mm, 阳极栅网底部距离收集孔 2 mm.

2.1 基本方程和原理

CNT 阴极电离规的工作主要受限于灵敏度低、发射电流小、真空测量下限不满足要求、阴极稳定性差等问题. 本文主要考虑电极电压对规管中电场分布、灵敏度和阳极电流 (阴极发射出来后穿过门极并参与气体分子电离的电子流) 与阴极发射电流比值 (I_{grid}/I_e) 的影响.

度, I_+ 是收集极接收的气相离子流, I 是电子流, σ 表示电子对某种气体的电离横截面, 其值正比于气体分子碰撞横截面和电离概率的乘积, 碰撞横截面取决于分子平均自由程.

因此, 由以上式子可以推导出两种规型灵敏度比对公式如下:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{L_1\sigma_1}{L_2\sigma_2} = \frac{L_1\gamma_1}{L_2\gamma_2}, \quad (4)$$

其中, 1, 2 分别代表两种电离规规型, γ 表示电离概率.

通常, 电离规的阳极电流和灵敏度均由实验测得, 在数值模拟中, 根据 (4) 式, 灵敏度的理论值可根据电子运动轨迹 L 和电离概率比对获得. 关于电

离概率和电子能量之间的关系, Lotz 对电子与原子碰撞电开展了实验研究, 并根据电离横截面的实验数据拟合得出近似的经验公式^[16]:

$$\sigma = \frac{a \cdot \ln(E/\chi_1)}{\chi_1 \cdot E} [\text{cm}^2], \quad \chi_1 \leq E \leq \chi_2, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sigma &= \sum_{i=1}^N \xi_i \frac{a \cdot \ln(E/\chi_i)}{\chi_i \cdot E} \\ &= \xi \frac{a \cdot \ln(E/\bar{\chi})}{\bar{\chi} \cdot E}, \quad E \geq \chi_N, \end{aligned} \quad (6)$$

其中, σ 表示电离横截面; E 表示电子能量 (eV); χ_1 表示原子最外层电子电离能 (eV); χ_2 表示仅次于最外层电子的亚层电子电离能 (eV), 依次类推; $\bar{\chi}$ 表示加权平均电离能 (eV); $a = 4.0 \times 10^{-14}$; $\xi \geq 0.5$, 作为慢变化函数, 其值逐渐趋近于等效电子数. 一般情况下, N 设置为 2, 对于 Kr, Xe 等, 设置 $N = 3$. 国内外学者实验研究的结果与以上经验公式一致性都非常好, 因而电离概率的比对将依据已有实验数据进行计算^[17].

由于 CNT 阴极电离规通常工作在超高/极高真空环境下, 所以在计算中可将空间电荷效应忽略, 对于电离规中电场分布可通过求解拉普拉斯方程 (7) 获得, 电子运动轨迹可通过求解静电场力作用下的牛顿运动方程 (8) 得到, 具体表达式如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} &= 0, \quad (7) \\ \frac{d^2 x}{dt^2} &= -\frac{e}{m} E_x, \end{aligned}$$

表 1 CNT 阴极电离规的边界条件说明

| CNT 阴极 | 门极 | 阳极 | 外屏 | 反射极 | 收集极 |
|--------|------|-------------|-----------|--------------------|------------|
| 发射电子 | 引出电子 | 接收进入电离区域的电子 | 真空室 外壁 | 分离气相离子 和 ESD 离子 | 收集气 相离子 |

对于传统的分离规而言, 其阴极电子发射机制为热致发射, 因此在较低的电极电压下即可实现工作. 然而, 对于分离规结构的 CNT 阴极电离规而言, 其阴极电子发射机制为场致发射 (开启电场强度不低于 10^6 V/m), 同时考虑到目前 CNT 阴极的制备和加工工艺水平, 需要在较高的电极电压下才能实现工作^[18]. 以门极间距 100 μm 为例, 对尺寸 5 mm 的 CNT 阴极, 针对电离规工作电流满足于 0.1 mA 的应用要求, 门极电压一般在 400 V 以上, 而热阴极一般工作在数十伏电位. 因而, 高的门极电压对

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y}{dt^2} &= -\frac{e}{m} E_y, \\ \frac{d^2 z}{dt^2} &= -\frac{e}{m} E_z. \end{aligned} \quad (8)$$

为提高计算精度和模拟结果的正确可靠, 在模拟计算中采用三维结构模型, 整个 CNT 阴极电离规计算模型的网格单元均为“六面体”型, 总网格数为 10^8 个左右. 图 2 给出了 CNT 阴极电离规电子发射系统 (阴极和门极) 的网格模型图. 根据方程 (7), (8) 及相应的边界条件, 利用有限差分法和超松弛迭代算法可计算出电离规中的电场分布, 采用四阶龙格库塔法计算静电场中的离子和电子的运动方程, 最终得到计算模型中离子和电子运动轨迹, 用以分析电极电压对 CNT 阴极电离规电场分布、灵敏度及 I_{grid}/I_e 比值的影响.

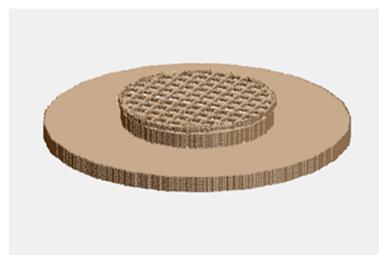


图 2 CNT 阴极电子发射系统网格划分图

2.2 边界条件设置

图 1 对模型的各个边界面都进行了标注, 并在表 1 中做了具体说明.

场发射阴极电离规性能的影响是数值模拟研究的重点, 电极电压具体参数设置见表 2.

2.3 模拟思路和步骤

极高真空测量中, 要尽可能延伸 CNT 阴极电离规测量下限, 需要提高灵敏度 S 和阳极电流 I_{grid} . 灵敏度由电极电压和电子有效运动轨迹决定; 阳极电流表示参与阳极区域气体电离的电子流, CNT 阴极电离规不同于传统热阴极电离规, CNT 阴极表面存在一个高电压门极, 阴极发射电子不能全部通过

门极栅网参与阳极区域气体分子的有效电离, 同时又因为门极电压较高 (通常达到 400 V 以上), 参与了阳极区域气体电离的电子中部分会逃逸进入真

空环境中, 不能全部被阳极接收, 因而, CNT 阴极电离规阳极电流计算必须考虑门极处电子透过率和规管中电子逃逸率。

表 2 CNT 阴极电离规电极电压设置

| 类型 | CNT 阴极/V | 门极/V | 阳极/V | 外屏 | 反射极 | 收集极/V |
|----|----------|------|----------|----|--------|-------|
| 1 | 0 | 550 | 550—1000 | 接地 | 等于阳极电压 | 0 |
| 2 | 0 | 450 | 450—1000 | 接地 | 等于阳极电压 | 0 |
| 3 | 0 | 350 | 350—1000 | 接地 | 等于阳极电压 | 0 |

根据 2.1 中的电离规基本方程, 考虑灵敏度定义式 (3) 和比对计算公式 (4), 综合考虑电场分布对电子运动轨迹、门极处电子透过率和电子逃逸率的影响, 研究电极电压对灵敏度和 I_{grid}/I_e 比值的影响. 具体步骤如下:

1) 根据当前 CNT 阴极的物理特性和制备工艺水平, 选定阴极的特性参数.

2) 基于 IE514 分离规设定规管结构参数, 和选定的 CNT 阴极相结合, 利用离子光学软件 SIMION 8.0 建立物理模型.

3) 确定规管中的有效电离空间. 所谓的有效电离空间, 是指在该空间中碰撞电离的离子能够被收集极接收. 在规管中假设某一点碰撞产生离子的位置, 计算该点的离子是否被离子收集极接收, 逐次变换碰撞电离产生离子的位置, 最终求解得到有效电离空间.

4) 变换电极电压设置, 计算电子有效运动轨迹 (分布在有效电离空间中的电子运动轨迹), 分析相应的灵敏度变化; 计算阴极发射电子在门极处透过率和规管中电子逃逸率, 分析 I_{grid}/I_e 比值.

3.1 电极电压对灵敏度影响分析

电极电压的变化对 CNT 阴极电离规规管空间的电场分布具有明显的影响, 从而会造成有效电离空间和电子有效运动轨迹的变化. 图 3 所示是选择不同电极电压, 对应规管中轴线电势分布变化曲线; 图 4 所示即电子总运动轨迹和电子有效运动轨迹的变化曲线. 由图可知, 电极电压改变造成了电场分布的变化, 而且随着阳极电压的升高, 电子总运动轨迹不断延长, 同等阳极电压条件下, 低门极电压 (350 V) 对应的轨迹最长, 有效运动轨迹则呈现出不同特点, 当阳极电压为门极电压的 1.6 倍左右时, 有效运动轨迹长度会达到一个局部小峰值.

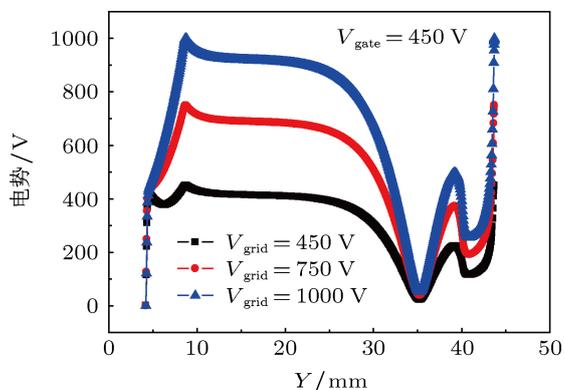


图 3 规管中沿 Y 轴电势变化关系

3 数值模拟与结果讨论

CNT 阴极电离规灵敏度取决于规型结构和电极电压, I_{grid}/I_e 比值取决于门极处的阴极发射电子的透过率和规管中电子逃逸率. 根据 2.1 的基本方程和 2.3 的模拟思路, 分析规管中电场分布和有效电离空间, 计算电子有效运动轨迹, 研究电极电压对灵敏度及 I_{grid}/I_e 比值的影响.

模拟中, CNT 阴极表面场发射电子相关参数设置如下: 电子初始能量为 0.1 eV, 带一个单位负电荷, 质量为 $5.48579903 \times 10^{-4}$ amu. 电子在 Y 方向初始位置坐标为 4.2 mm, 随机分布在 XZ 平面上直径 5 mm 的圆面内, 圆心坐标为 (0, 4.2, 0).

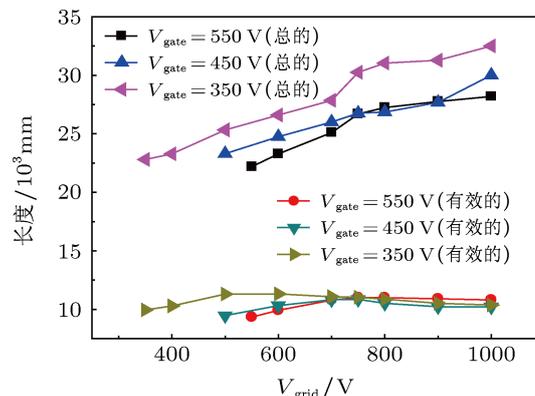


图 4 电子运动轨迹长度随阳极电压变化关系

对于灵敏度的计算,由定义式计算其数值非常困难,通常利用实验手段获得其实验值,本文通过 CNT 阴极电离规和 IE514 分离规的有效电子运动轨迹(分布于有效电离空间中的电子运动轨迹)比对,同时,根据比对公式(3),考虑了不同阳极电压对应电离概率之间的比对值(以 N_2 分子为例, $\gamma_{220V}/\gamma_{500V} \approx 1.6$)^[17],最终理论推导得出不同电极电压条件下的 CNT 阴极电离规灵敏度数值. IE514 分离规的电子运动轨迹如图 5(b) 所示,图 5(a) 和图 6 是 CNT 阴极电离规电子运动轨迹和通过离子运动轨迹模拟获得的有效电离空间(电压设置:门极 450 V,阳极 700 V,反射极 700 V),与已报道的研究结果符合性很好^[4,5].

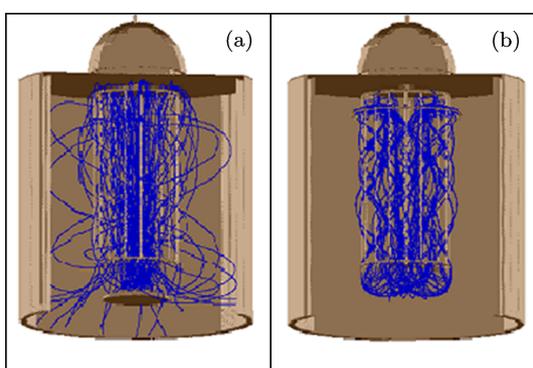


图 5 电子运动轨迹 (a) CNT 阴极电离规; (b) IE514 分离规



图 6 有效电离空间二维平面图

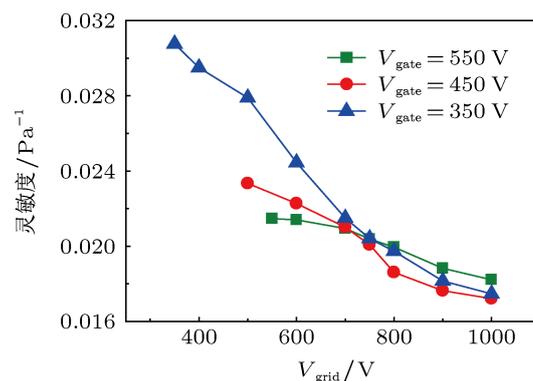


图 7 灵敏度随阳极电压变化关系

灵敏度的数值模拟中,根据 CNT 阴极的工作特性,门极电压分别设置为 550 V, 450 V, 350 V, 阳极电压由 350 V 到 1000 V 可调,结果如图 7 所示. 当门极电压固定为 450 V, 阳极电压不断变化时,灵敏度模拟结果介于 0.017 Pa^{-1} — 0.025 Pa^{-1} 之间,其中,阳极电压 700V 时对应的灵敏度为 0.020 Pa^{-1} ,此结果与文献报道结果具有很好的一致性. 文献[4]的实验研究结果为: 0.015 — 0.019 Pa^{-1} (真空度低于 $1 \times 10^{-7} \text{ Pa}$),最高值可以达到 0.03 Pa^{-1} . 以上分析说明了本文计算模型和模拟方法的正确性,此数值模拟结果也为实验分析结果提供了很好的理论依据.

由图 7 可知,在三组不同门极电压条件下,灵敏度都会随着阳极电压的升高会逐渐下降,分析其原因,此变化规律是由电子碰撞电离概率和有效运动轨迹决定的. 首先,由图 4 可知,随着阳极电压的升高,电子总运动轨迹会不断延长,而当阳极电压为门极电压的 1.6 倍左右时,有效运动轨迹长度会达到一个局部小峰值,但是有效轨迹长度随阳极电压变化整体趋于平稳;其次, CNT 阴极电离规与传统热阴极电离规(150 V—200 V 左右阳极电压)相比, CNT 阴极电离规需要在较高的门极电压和阳极电压下工作,而阳极电压升高会造成电离概率的显著下降. 以 N_2 分子为例,实验得出电离区域中的电子能量为 100 eV 左右时,与电离概率相关的系数 ϵ 达到最大,其值为 10.25 左右,随着电子能量进一步增大, ϵ 显著下降,电子能量为 500 eV 时, ϵ 降为 5.53^[17]. 由此可知,阳极电压变化造成的电子有效运动轨迹长度变化一定程度上会影响灵敏度数值,但不是主要影响因素,而导致灵敏度变化的主要原因是门极电压和阳极电压升高所造成的电子电离概率下降. 通过对图 7 中的三条曲线分析表明,选择较高门极电压,对应灵敏度平均值较低,这一结

果进一步证明阳极电压的升高造成规管中电子电离概率下降是导致灵敏度下降的根本原因.

3.2 电极电压对电子透过率和逃逸率影响分析

电极电压的变化对 CNT 阴极和门极之间电场分布会产生较为显著的影响. 图 8 所示是选择不同电极电压, 对应阴极和门极之间电势沿 X 轴方向的分布变化曲线. CNT 阴极表面和门极之间的电场作用是实现电子发射, 当阴极和门极电压恒定时, 阴极电子发射受到的影响很小; 而阳极和门极之间的电势差主要影响阴极场发射电子从门极的引出效率——电子透过率(穿过门极栅网进入阳极电离区域的电子流占阴极发射总电流的比例). 数值模拟中, 在阴极表面设置 2000 个电子, 统计能够穿过门极栅网的电子数, 计算透过门极电子数与阴极发射总电子数比值, 即电子透过率. 模拟结果如图 9 所示, 三组不同门极电压下, 电子透过率随阳极电压改变显示出相同的变化趋势, 即随着阳极电压和门极电压比值 (V_{grid}/V_{gate}) 的升高, 电子透过率会逐渐增大, 因而阳极电压的升高, 会获得较高的阳极电流, 使得更高比例的阴极发射电子参与气体分子电离.

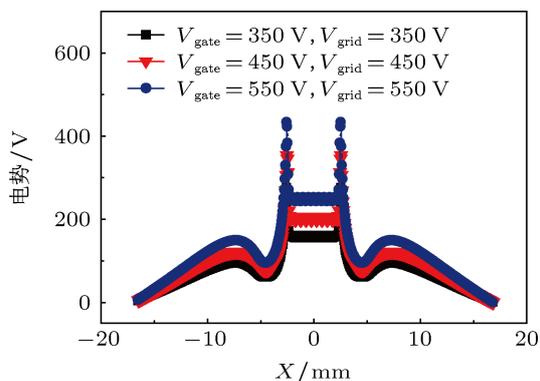


图 8 门极表面沿 X 轴线方向电势变化曲线

然而实际中, 进入阳极电离区域参与气体电离的电子并不能全部被阳极收集, 部分电子会被其他电极接收而形成逃逸电子, 此部分逃逸电子占透过门极的总电子数的比例定义为电子逃逸率. 电子逃逸一方面缩短了电子有效运动路径, 使灵敏度降低; 另一方面, 电子逃逸率的波动会造成灵敏度稳定性变差. 电子逃逸率的计算方法类似于电子透过率, 即统计逃逸入真空环境中的电子数, 并计算其与透

过门极总电子数的比值. 计算结果如图 10 所示, 电子逃逸率会随着阳极电压的升高而升高. 因此, 在综合考虑阴极发射电子在门极处电子透过率和规管中电子逃逸率的条件下, 模拟真实可测的阳极电流和发射电流比值 (I_{grid}/I_e) 变化如图 11 所示, 此模拟结果能够很好地说明已报道实验结果 [4,8,14]. 由此也可见, 数值模拟中若考虑了电子逃逸率, 使得模拟结果能够与实际实验结果更加一致.

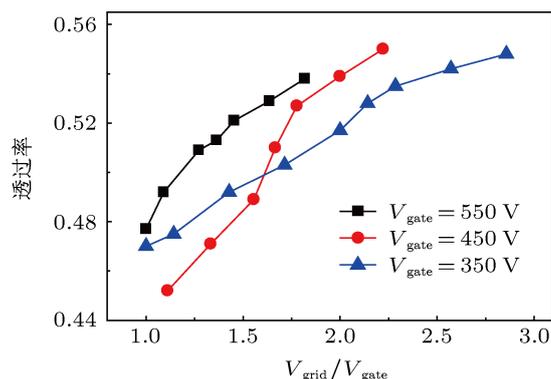


图 9 门栅电子透过率随 V_{grid}/V_{gate} 变化曲线

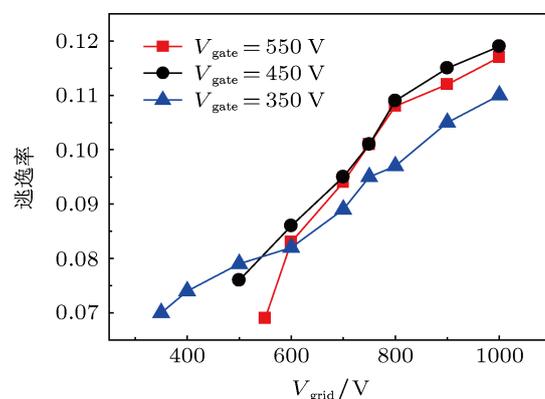


图 10 规管中电子逃逸率随阳极电压变化曲线

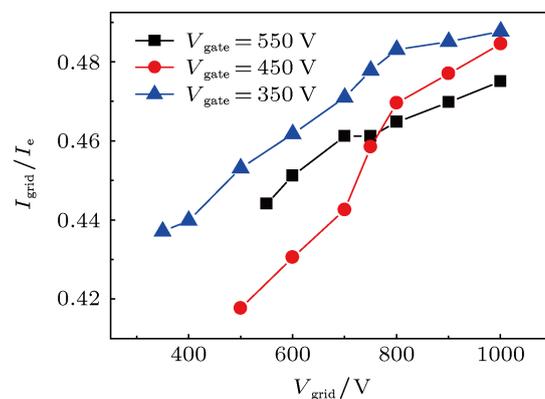


图 11 I_{grid}/I_e 比值随阳极电压变化曲线

4 结 论

本文利用 SIMION 8.0 建立了 CNT 阴极电离规的物理模型, 分析研究了电极电压对灵敏度和阳极电流的影响. 由于 CNT 阴极需要较高引出电场实现电子场发射, 所以 CNT 阴极电离规需要较高的电极电压. 结果表明, 当阳极电压升高时, I_{grid}/I_e 比值随之增大, 但是, 对应的电离规灵敏度会随着阳极电压升高而降低. 因此, 在理论设计和实验研究中, 综合考虑电极电压对灵敏度和阳极电流的影响, 对于提高 CNT 阴极电离规的综合性能非常重要. 该模拟计算结果与相关文献资料已报道实验结果具有很好的符合性, 说明计算模型和参数设置合

理, 计算结果正确可靠, 为实验研究提供了重要的理论依据, 对基于分离规结构的 CNT 阴极电离规的优化设计具有重要的指导意义, 也是对国内外普遍采用的实验研究方法^[4-14]的一个必要理论补充和验证, 推进了对 CNT 阴极电离规原理特性的理论探索.

此外, 通过分析本文所采用的电极电压对 CNT 阴极电离规性能影响的数值模拟思路可知, 该方法将可推广应用于新型 CNT 阴极极高真空电离规的研发和理论分析中, 为解决极高真空测量难题提供了有效的研究途径, 具有重要的理论意义和广泛的应用价值.

-
- [1] St. Wilfert, Chr. Edelmann 2012 *Vacuum* **86** 556
- [2] Cai M, Li D T, Cheng Y J, Chang P 2011 *J. Vac. Sci. Technol* **31** 732 (in Chinese) [蔡敏, 李得天, 成永军, 常鹏 2011 真空科学与技术学报 **31** 732]
- [3] Li D T, Cheng Y J, Feng Y, Cai M 2012 *Shanghai Measurement and Testing* **39** 2 (in Chinese) [李得天, 成永军, 冯焱, 蔡敏 2012 上海计量测试 **39** 2]
- [4] Dong C K, Myneni G R 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 5443
- [5] Dong C K 2003 *Ph. D. Dissertation* (Virginia: Old Dominion University)
- [6] Sheng L M, Liu P, Wei Y, Liu L, Qi J, Fan S S 2005 *Diam. & Relat. Mater.* **14** 1695
- [7] In-Mook Choi, Sam-Yong Woo 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 173104
- [8] Huang J X, Chen J, Deng S Z, Xu N S 2007 *J. Vac. Sci. Technol.* **B 25** 651
- [9] Alexanderov S Y, Arkhipov A V, Mishin M V, Sominski G G 2007 *Surf Interf. Anal.* **39** 146
- [10] Xiao L, Qian L, Wei Y, Liu L, Fan S S 2008 *J. Vac. Sci. Technol.* **A 26** 1
- [11] Hirofumi-Suto, Shunjiro Fujii, Kumiko Yoshihara, Kazuhiro Ishida, Yuya Tanaka, Shin-ichi Honda, Mitsuhiro Katayama 2008 *Jpn J. Appl. Phys.* **47** 2032
- [12] Knapp W, Scheleussner D, Wüest M 2008 *J. Phys.: Conf Ser.* **100** 092007
- [13] Yang Y C, Qian L, Tang J, Liu L, Fan S S 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 153105
- [14] Liu H R, Hitoshi Nakahara, Sashiro Uemura, Yachachi Saito 2009 *Vacuum* **84** 713
- [15] Dahl D A, SMION 3D Version 8.0. Idaho National Laboratory, P. O. Box 1625, Idaho Falls, ID 83415 2008
- [16] Lotz W 1967 *Astrophys. J. Suppl.* **14** 207
- [17] Tate J T, Smith P T 1932 *Phys. Rev.* **39** 270
- [18] Yuan X S, Zhang Y, Sun L M, Li X Y, Deng S Z, Xu N S, Yan Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 21610 1 (in Chinese) [袁学松, 张宇, 孙利民, 黎晓云, 邓少芝, 许宁生, 鄢扬 2012 物理学报 **61** 216101]

Numerical simulation of electrode potential influence on the performance of ionization gauge with carbon nanotubes cathode*

Zhang Hu-Zhong¹⁾²⁾ Li De-Tian¹⁾²⁾† Dong Chang-Kun¹⁾²⁾‡
Cheng Yong-Jun¹⁾ Xiao Yu-Hua¹⁾

1) (*Science and Technology on Vacuum & Cryogenics Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China*)

2) (*Institute of Micro-nano Structures & Optoelectronic Devices, Wenzhou University, Wenzhou 325000, China*)

(Received 26 September 2012; revised manuscript received 10 January 2013)

Abstract

Theoretical studies of electrodes potential influence on the sensitivity and ratio of anode current and emission current (I_{grid}/I_e) will be beneficial for providing theoretical basis and experimental instruction in the research of ionization gauge with carbon nanotubes cathode. In this paper, based on the structure of IE514 extractor gauge, the model of carbon nanotube ionization gauge is built by ion optic simulation software SIMION 8.0. And the influence of electrode potential on the sensitivity and I_{grid}/I_e is discussed. Results show that with increasing ratio between anode voltage and gate voltage ($V_{\text{grid}}/V_{\text{gate}}$), I_{grid}/I_e increases, while the sensitivity of the gauge decreases with the increase in anode voltage, which would further affect the extension of vacuum measurement lower limit. Moreover, the simulation results are in good agreement with the experimental data reported. Consequently, it is very important to improve the sensitivity, anode current and extension of measurement lower limit to set up an appropriate electrode voltage. In addition, the method adopted in this paper can be extended to the research and development of new-styles of extremely high vacuum ionization gauge of carbon nanotube cathode, which could provide an effective method to resolve the problem of extremely high vacuum measurement.

Keywords: carbon nanotube ionization gauge, electrode voltage, sensitivity, anode current

PACS: 07.30.Dz, 07.56.-e, 02.60.Cb

DOI: 10.7498/aps.62.110703

* Project supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars (Grant No. 61125101).

† Corresponding author. E-mail: lidetian@hotmail.com

‡ Corresponding author. E-mail: dck@wzu.edu.cn