

# 真空虚拟阴极控制方法研究\*

李建泉<sup>1)2)†</sup> 王明哲<sup>1)2)</sup> 忽文豪<sup>1)2)</sup> 李浩<sup>1)2)</sup>

1) (华北电力大学, 电子与通信工程系, 保定 071003)

2) (华北电力大学, 河北省电力物联网技术重点实验室, 保定 071003)

## 摘要

基于已有的一维虚拟阴极理论模型, 本研究进一步建立了真空虚拟阴极控制理论, 并由此研发了一套完整的真空虚拟阴极控制系统。该控制系统可以通过调节阴极加热温度、饱和电子发射电流以及电子收集电流等参数, 从而分别实现对真空虚拟阴极电势和宽度的准确控制。以钨阴极为研究对象, 进一步的测试结果表明, 在保持电子收集电流与饱和电子发射电流之比不变时, 虚拟阴极电势会随着加热温度的增加而线性增大; 在保持加热温度不变时, 虚拟阴极电势会随着电子收集电流的增大呈对数减小。另一方面, 在满足强虚拟阴极条件时, 虚拟阴极宽度与加热温度的四分之三次方成正比, 与电子收集电流的二分之一一次方成反比, 而与阴极材料属性无关。

**关键词:** 虚拟阴极, 加热温度, 饱和电子发射电流, 电子收集电流

**PACS:** 79.40.+z, 79.10.-n, 06.20.Dk

**基金:** 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2026MS142)资助的课题。

† 通信作者 E-mail: liHjianquan@163.com

## 1 引言

在阴极材料受热向外发射电子的过程中, 由于电子初始速度的差异, 低能电子会逐渐聚集在阴极附近, 从而导致阴极附近的电势低于其表面电势, 该现象被称为“虚拟阴极”<sup>[1-5]</sup>。虚拟阴极作为热阴极电子发射过程中的一种重要物理现象, 在很多研究领域具有重要的应用价值。首先, 热阴极是电子枪、电子显微镜、X射线机以及真空电子管等各种电子源仪器的核心部件<sup>[6-12]</sup>, 虚拟阴极的存在会导致热阴极产生的电子发射电流输出信号发生衰减, 从而影响这些设备的性能参数。

---

因此，在这些电子源设备中，为了提高设备的性能参数，通常希望其内部的热阴极在工作时产生的虚拟阴极越小越好。其次，虚拟阴极也是影响发射探针测量等离子体空间电位的最重要误差源之一<sup>[13-17]</sup>。在理想的发射探针 I-V 曲线中，其拐点电位通常代表着准确的等离子体空间电位。然而在实际情况中，由于虚拟阴极的存在，导致 I-V 曲线的拐点电位总是稍低于实际的等离子体空间电位，并且随着发射探针加热温度的升高，电子发射逐渐增强，所形成的虚拟阴极也会逐渐增大，最终导致发射探针 I-V 曲线的拐点电位进一步偏离实际的等离子体空间电位。因此，在利用发射探针测量空间电势时，同样需要保持虚拟阴极越小越好。第三，在高功率微波源中，虚拟阴极振荡器能够通过周期性的电荷积累与释放产生千兆赫兹的电磁辐射，是设备输出微波能量的核心机制，关于这类设备的研发则着重关注虚拟阴极的产生及其随时间的振荡<sup>[18-21]</sup>。最后，在气体放电等低温等离子体中以及磁约束聚变等离子体中，热阴极也经常作为电子发射源，提供等离子体产生时所需的初级电子，参与等离子体生成与约束。因此，在等离子体发生器中，热阴极产生的虚拟阴极的动态行为与电磁场耦合作用密切相关，并直接影响等离子体特性及其放电的稳定性<sup>[22-25]</sup>。

在我们近期关于发射探针灯丝引起的虚拟阴极研究中，我们建立了一维真空虚拟阴极理论模型，并基于热电子初始速率呈麦克斯韦分布的假设，推导出虚拟阴极势阱深度和空间宽度的解析表达式，同时也完成了真虚空虚拟阴极的误差理论建模<sup>[1-5]</sup>。基于该虚拟阴极理论，我们测算了钨丝发射探针在工作时产生的虚拟阴极电势约为伏特量级，其宽度约为厘米量级，该研究不仅对钨阴极工作时产生的虚拟阴极大小给出了定性结论，同时也为虚拟阴极的实验测量提供了重要参考。

尽管人们对虚拟阴极已经有了一定的了解，但目前仍存在很多认知空白。截

至目前，影响虚拟阴极的主要因素及其作用机制尚不明确，有效的虚拟阴极控制方法及相关系统仍有待研发。基于课题组已经建立的一维虚拟阴极理论，本研究将继续完成真空虚拟阴极控制理论，并在此基础上研发搭建一套完整的真空虚拟阴极控制系统，最终利用该系统实现对真空虚拟阴极电势和宽度的准确控制，从而为今后真空虚拟阴极的实验研究和应用推广奠定基础。

## 2 虚拟阴极控制理论

根据已有的一维虚拟阴极理论<sup>[1-5, 17, 26, 27]</sup>可知，虚拟阴极的电势（ $\Delta\varphi = \varphi_v - \varphi_c$ ）和宽度（ $x_v$ ）计算公式如下：

$$\Delta\varphi = \varphi_v - \varphi_c = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{I_c}{I_E} \right) \quad (1)$$

$$x_v = \frac{\arccos \left[ \exp \left( \frac{e\Delta\varphi}{2kT} \right) \right]}{\sqrt{\frac{eAT}{2\varepsilon_0 k v}} \exp \left( \frac{e\Delta\varphi - \phi_{\text{work}}}{2kT} \right)} \quad (2)$$

其中， $\varphi_c$  表示热阴极表面电势； $\varphi_v$  表示虚拟阴极中的最低电势； $T$  表示阴极加热温度； $k$  是玻尔兹曼常数； $\varepsilon_0$  是真空介电常数； $I_E$  表示热阴极发射的总的电子电流，即饱和电子发射电流； $I_c$  表示能够克服虚拟阴极从而被阳极收集到的电子电流； $\bar{v} = \sqrt{\frac{2kT}{\pi m_e}}$ ，表示热阴极表面所有电子的平均速度； $m_e$  表示电子的质量； $A$  表示杜师曼常数； $\phi_{\text{work}}$  表示阴极的电子逸出功。

若考虑电流比  $\frac{I_c}{I_E}$  为一个整体变量，则方程（1）意味着，虚拟阴极电势与加热温度成正比，与  $\frac{I_c}{I_E}$  的对数成正比，而与阴极材料属性（ $A$  和  $\phi_{\text{work}}$ ）无关。与此同时，方程（2）可变为：

$$x_v = \left( \frac{8\varepsilon_0^2 k^3}{\pi m_e e^2 A^2} \right)^{\frac{1}{4}} \frac{\arccos \sqrt{\frac{I_C}{I_E}}}{\sqrt{\frac{I_C}{I_E}}} T^{\frac{1}{4}} \exp\left(\frac{\phi_{\text{work}}}{2kT}\right) \quad (3)$$

引入  $I_E$  的表达式，即理查德森-杜师曼方程：

$$I_E = AST^2 \exp\left(-\frac{\phi_{\text{work}}}{kT}\right) \quad (4)$$

则方程（3）可变为：

$$x_v = \left( \frac{8S^2 \varepsilon_0^2 k^3}{\pi m_e e^2 I_C^2} \right)^{\frac{1}{4}} T^{\frac{3}{4}} \arccos \sqrt{\frac{I_C}{I_E}} \quad (5)$$

其中， $S$  表示热阴极的表面积。进一步考虑当  $I_C \ll I_E$  时，即虚拟阴极很强时，

$\arccos \sqrt{\frac{I_C}{I_E}} \approx \frac{\pi}{2}$ ，则上式可变为：

$$x_v = \left( \frac{S^2 \varepsilon_0^2 k^3 \pi^3}{2m_e e^2} \right)^{\frac{1}{4}} \frac{T^{\frac{3}{4}}}{\sqrt{I_C}} \quad (6)$$

进一步假设，当方程（5）和（6）之间的相对差别小于 1% 时，二者近似相等，则

可计算得到此时的电流比阈值约为 0.00024，即在  $\frac{I_C}{I_E} \leq 0.00024$  时，满足强虚拟阴

极条件，此时虚拟阴极宽度大小与  $T^{\frac{3}{4}}$  成正比，与  $\sqrt{I_C}$  成反比，而与阴极材料属性（ $A$  和  $\phi_{\text{work}}$ ）无关。

### 3 虚拟阴极控制软件流程

虚拟阴极控制系统的软件部分由 LabVIEW 编程实现，其中对虚拟阴极电势和宽度的控制流程分别如图 1 和图 2 所示。

#### 3.1 虚拟阴极电势

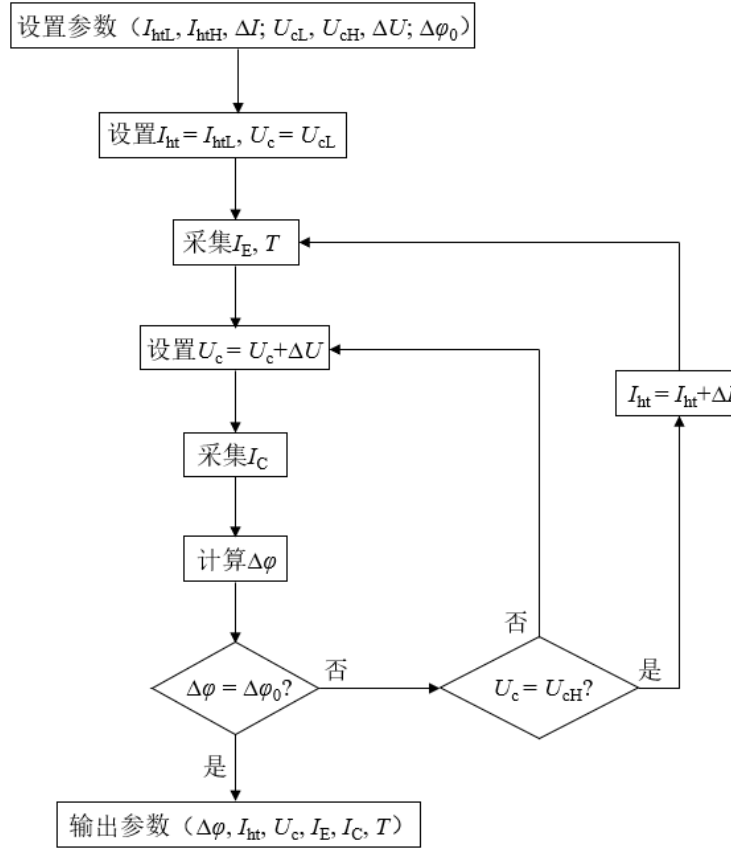


图 1 虚拟阴极电势控制软件流程图

Fig. 1. Software flowchart of virtual cathode potential control.

根据上述虚拟阴极控制理论可知，虚拟阴极电势只与加热温度以及电流比  $\frac{I_C}{I_E}$  有关，而与阴极材料属性无关。因此，如图 1 所示，在对真空气体虚拟阴极的电势进行控制时，首先需要在软件程序中设置热阴极灯丝的最低加热电流 ( $I_{hL}$ )、最高加热电流 ( $I_{hH}$ ) 及其调节步长 ( $\Delta I_{ht}$ )，最小偏置电压 ( $U_{cL}$ )、最大偏置电压 ( $U_{cH}$ ) 及其调节步长 ( $\Delta U$ ) 以及虚拟阴极的电势控制目标 ( $\Delta \phi_0$ )；其次，设置初始加热电流和初始偏置电压均为最低值 ( $I_{hL}, U_{cL}$ )，并在该条件下采集阳极收集到的电子电流信号，该电流即为在加热电流为  $I_{hL}$  时热阴极灯丝产生的饱和电子发射电流  $I_E$ ，同时程序控制红外测温仪对热阴极灯丝进行加热温度测量，获得在加热电流为  $I_{hL}$  时阴极灯丝的加热温度  $T$ ；第三，步进偏置电压至下一个调节数值，并采集此时阳极收集到的电子电流信号，即为  $I_C$ ；第四，利用采集的数

据  $(I_E, I_C, T)$  以及方程 (1)，计算得到此时的虚拟阴极电势  $\Delta\phi$ ；第五，判别  $\Delta\phi$  与目标数值  $\Delta\phi_0$  之间的关系，若二者保持一致，则输出此时的数据  $(\Delta\phi, I_{ht}, U_c, I_E, I_C, T)$ ，若二者不一致，则继续步进偏置电压至下一个调节数值，直至  $\Delta\phi$  与目标数值  $\Delta\phi_0$  保持一致，若依次调节偏置电压至最大值，仍无法获得虚拟阴极电势的目标数值，则步进加热电流至下一个调节数值，重复以上步骤二、三、四、五，直至获得虚拟阴极电势的目标数值，并完成数据输出。

### 3.2 虚拟阴极宽度

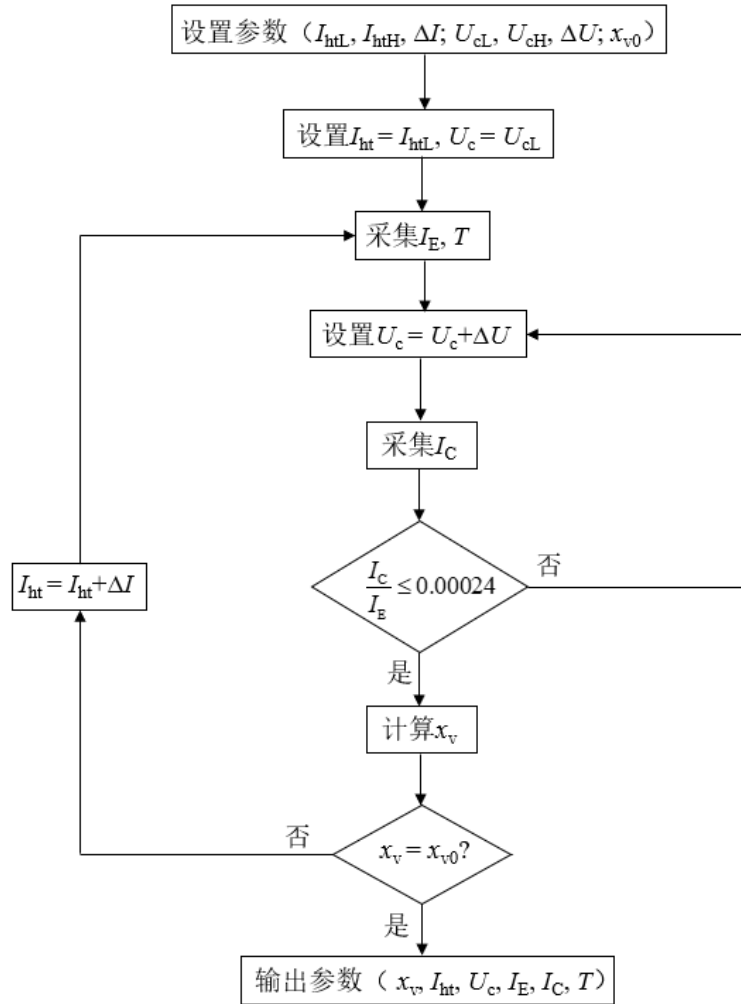


图 2 虚拟阴极宽度控制软件流程图

Fig. 2. Software flowchart of virtual cathode width control.

根据虚拟阴极控制理论可知，在热阴极灯丝面积保持不变且满足电流比

---

$\frac{I_C}{I_E} \leq 0.00024$ ，即虚拟阴极很强时，虚拟阴极宽度只受  $T$  和  $I_C$  控制，而与阴极材

料属性无关。因此，如图 2 所示，在对真空虚拟阴极的宽度进行控制时，首先需要在软件程序中设置热阴极灯丝的最低加热电流（ $I_{htL}$ ）、最高加热电流（ $I_{htH}$ ）及其调节步长（ $\Delta I_{ht}$ ），最小偏置电压（ $U_{cL}$ ）、最大偏置电压（ $U_{cH}$ ）及其调节步长（ $\Delta U$ ）以及虚拟阴极的宽度控制目标（ $x_{v0}$ ）；其次，设置初始加热电流和初始偏置电压均为最低值（ $I_{htL}$ ， $U_{cL}$ ），并在该条件下采集阳极收集到的电子电流信号，该电流即为在加热电流为  $I_{htL}$  时热阴极灯丝产生的饱和电子发射电流  $I_E$ ，同时程序控制红外测温仪对热阴极灯丝进行加热温度测量，获得在加热电流为  $I_{htL}$  时热阴极灯丝的加热温度  $T$ ；第三，步进偏置电压至下一个调节数值，并采集此时阳极收集到的电子电流信号，即为  $I_C$ ；第四，计算电流比  $\frac{I_C}{I_E}$ ，并判别其是否小于等于 0.00024，若满足要求，则利用采集的数据（ $I_E$ ， $I_C$ ， $T$ ）以及方程（6），计算得到此时的虚拟阴极宽度  $x_v$ ，若不满足要求，则步进偏置电压至下一个调节数值，重复以上步骤二、三、四，直至满足电流比要求；第五，判别  $x_v$  与目标数值  $x_{v0}$  之间的关系，若二者保持一致，则输出此时的数据（ $x_v$ ， $I_{ht}$ ， $U_c$ ， $I_E$ ， $I_C$ ， $T$ ），若二者不一致，则步进加热电流至下一个调节数值，直至  $x_v$  与目标数值保持一致，并完成数据输出。

此外，根据我们之前对钨阴极电子发射特性的研究可知，钨阴极灯丝在通电加热之后，需要数秒钟的时间才能加热至目标温度，并获得稳定的电子发射电流输出<sup>[3]</sup>。因此，在虚拟阴极控制程序中，我们设定在通电 5 秒之后开始自动采集阴极的电子发射电流和温度数据，这样能够有效避免热阴极灯丝刚受热时的非稳定状态对虚拟阴极测量结果的影响。



## 4 虚拟阴极控制系统硬件构成

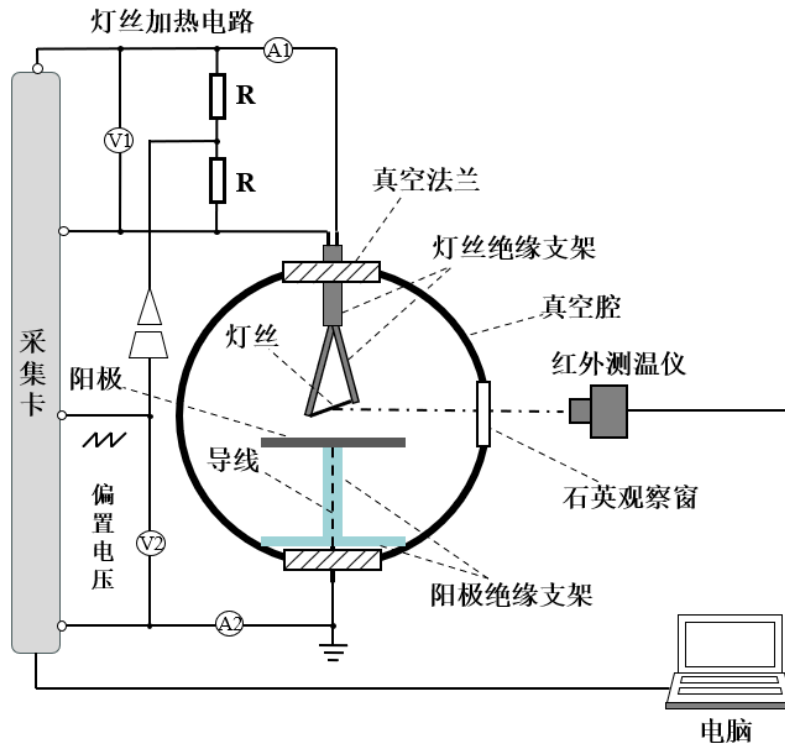


图 3 虚拟阴极控制硬件构成示意图

Fig. 3. Schematic diagram of the hardware composition of virtual cathode control.

如图 3 所示，真空气体虚拟阴极控制系统的硬件构成主要包括真空腔、热阴极灯丝、阳极、采集卡、电脑、阴极加热电路、阴极扫描偏压电路以及红外测温系统等。其中，真空腔提供虚拟阴极产生所需的真空环境；热阴极灯丝由常见的热阴极材料制成，如钨、钼、钍钨阴极、氧化物阴极以及六硼化镧等，灯丝受热能够发射电子，从而形成电子发射电流；阳极部件为一个不锈钢圆盘，阳极与真空腔之间通过一个由聚四氟乙烯制成的绝缘支架进行固定，并确保阳极与真空腔之间相互绝缘，此外阳极通过绝缘支架中的内置导线与真空腔外部的接地电极相连；阴极扫描偏压电路负责在阳极和阴极灯丝之间施加不同的偏置电压  $U_c$ ，可以获得并控制电子收集电流  $I_c$  的大小；阴极加热电路负责对阴极灯丝施加不同的加热电流  $I_{ht}$ ，进而控制  $T$  和  $I_E$  的大小；采集卡分别连接加热电路、扫描偏压电路和电脑，并由电脑程序控制采集卡，进而分别控制  $I_c$  和  $I_E$ ；红外测量系统负责实时监



测阴极灯丝的加热温度，并将温度数据传输至电脑；电脑根据采集卡传输的  $I_c$  和  $I_E$ 、以及测温系统采集的  $T$ ，通过程序软件自动计算虚拟阴极的电势和宽度大小。

## 5 虚拟阴极控制结果

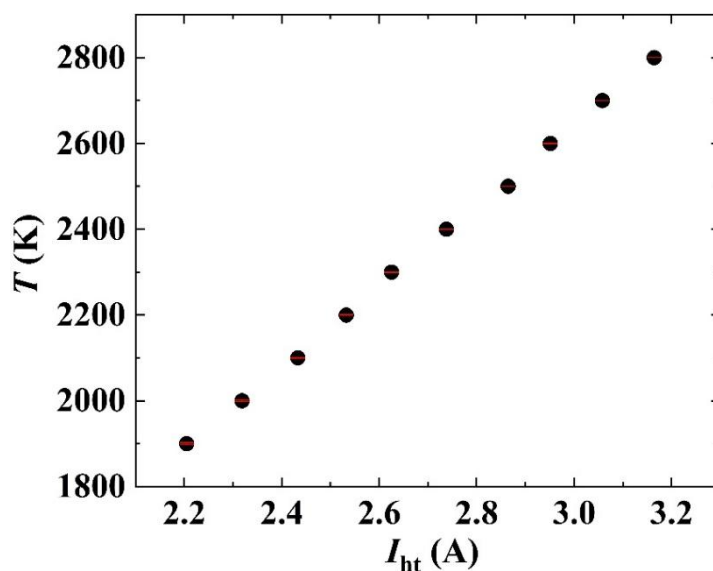


图 4 钨阴极加热温度随加热电流的变化趋势

Fig. 4. The variation trend of  $T$  of tungsten cathode with  $I_{ht}$ .

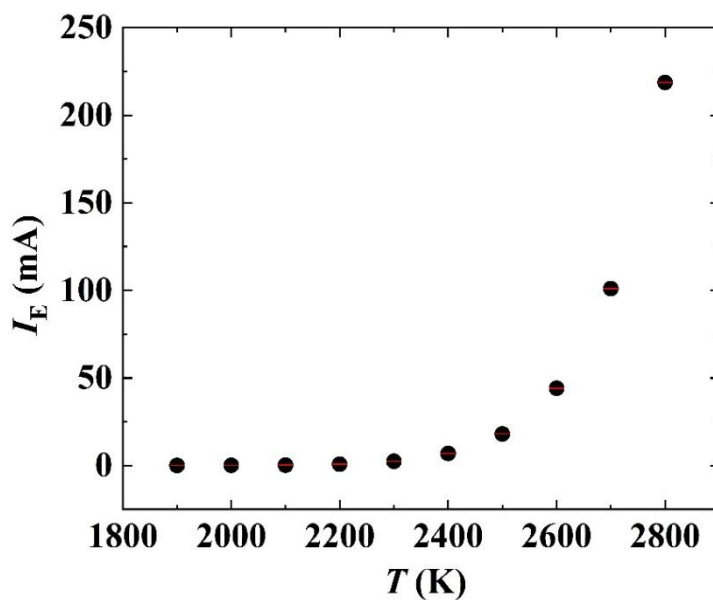


图 5 钨阴极的电子发射电流随加热温度的变化趋势

Fig. 5. The variation trend of  $I_E$  of tungsten cathode with  $T$ .

利用该虚拟阴极控制系统，我们在一个内径 295 mm、深约 285 mm 的柱状真

空腔中，对一根直径约 0.15 mm、长约 21 mm 的钨丝产生的虚拟阴极特征参数进行调控研究。实验过程中，真空腔内维持极限真空，约  $5.0 \times 10^{-4}$  Pa。图 4 展示的是将钨阴极灯丝加热至不同目标温度时所需的加热电流大小，可以发现，在钨阴极的目标温度范围内（1900~2800 K）， $T$  与  $I_{ht}$  之间近似呈线性增加关系，与之前文献中报道的现象保持一致<sup>[2]</sup>。图 5 展示的是钨阴极在不同加热温度时产生的电子发射电流大小，可以发现，随着  $T$  的增加， $I_E$  近似呈指数增加，满足理查德森-杜师曼方程。图 6 和 7 分别展示的是虚拟阴极电势随  $T$  和  $I_C$  的变化趋势及其关系拟合。其中，在保持电流比不变（ $\frac{I_C}{I_E} = 0.00024$ ）时，随着  $T$  的增加， $\Delta\phi$  的绝对值呈线性增大；在保持加热温度不变（ $T = 2400$  K）时，随着  $I_C$  的增大， $\Delta\phi$  的绝对值呈对数减小。这是由于在控制电流比不变时，随着  $T$  的增加，积聚在阴极附近的电子数量越来越多，因而所形成的虚拟阴极越来越显著。另一方面，在控制  $T$  不变时，则  $I_E$  基本恒定，随着  $I_C$  的增大，积聚在阴极附近的电子数量越来越少，因而所形成的虚拟阴极越来越弱。

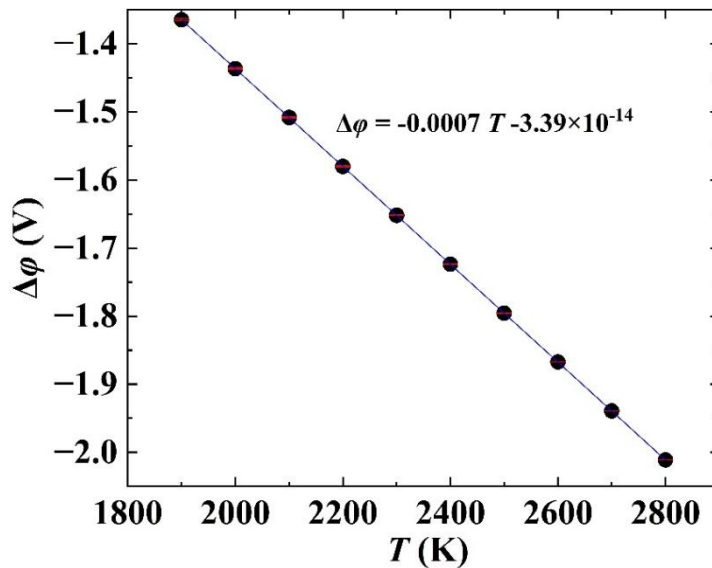


图 6 电流比  $\frac{I_C}{I_E}$  保持不变时，虚拟阴极电势随加热温度的变化趋势及其关系拟合。

Fig. 6. The trend of virtual cathode potential variation with  $T$  and its fitted relationship when the current

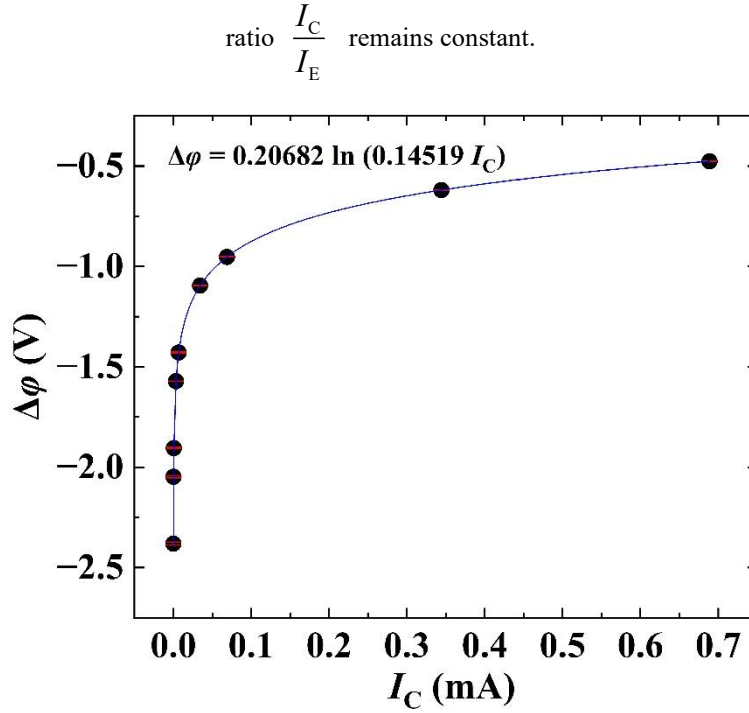


图 7 加热温度保持不变时，虚拟阴极电势随电子收集电流的变化趋势及其关系拟合。

Fig. 7. The trend of virtual cathode potential variation with  $I_C$  and its fitted relationship when  $T$

remains constant.

图 8 和 9 分别展示的是虚拟阴极宽度随  $T$  和  $I_C$  的变化趋势及其关系拟合。其中，在保持  $I_C$  不变时，我们设置不同加热温度时的  $I_C$  均为 14 nA，这样能够保证在所有目标温度时均满足强虚拟阴极条件，即满足电流比  $\frac{I_C}{I_E} \leq 0.00024$ 。实验结果表明，随着  $T$  的增加， $x_v$  与  $T^{\frac{3}{4}}$  成正比，满足方程 (6)。这是由于在控制电子收集电流不变时，随着  $T$  的增加， $I_E$  越来越大，但积聚在阴极附近的电子数量越来越多，因而所形成的虚拟阴极势阱越深，其宽度也越大。另一方面，在保持加热温度不变 ( $T = 2400$  K) 时，为了满足强虚拟阴极条件，程序中设置  $I_C$  最大不超过 1.65  $\mu$ A。实验结果表明，随着  $I_C$  的增大， $x_v$  与  $\sqrt{I_C}$  成反比，同样与方程 (6) 保持一致。这是由于在控制  $T$  不变时， $I_C$  越大意味着积聚在阴极附近的电子数量

越来越少，因而所形成的虚拟阴极越来越弱，其宽度越小。此外，值得注意的是，在不满足强虚拟阴极条件时，方程（6）不成立，此时热阴极产生的虚拟阴极宽度必须由方程（2）计算得到，此时的虚拟阴极宽度大小不仅受  $T$  和  $I_C$  的控制，而且也与阴极材料属性（ $A$  和  $\phi_{\text{work}}$ ）密切相关。

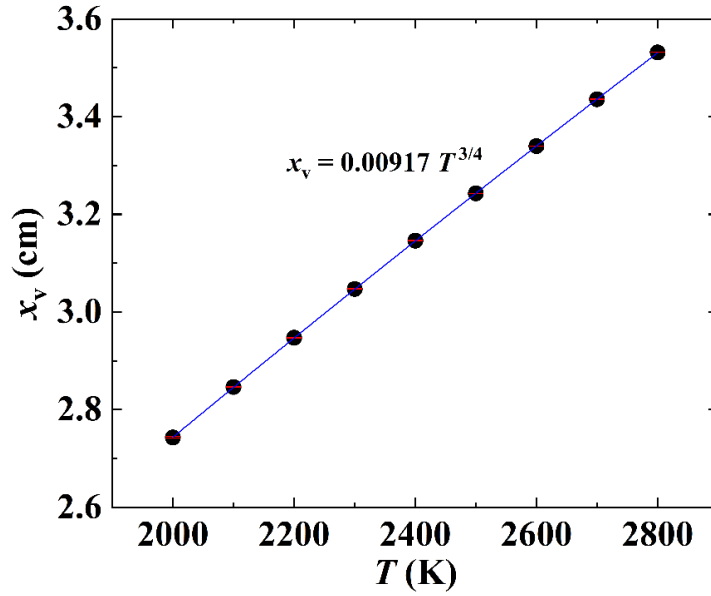


图 8 电子收集电流保持不变时，虚拟阴极宽度随加热温度的变化趋势及其关系拟合。

Fig. 8. The trend of virtual cathode width variation with  $T$  and its fitted relationship when  $I_C$  remains constant.

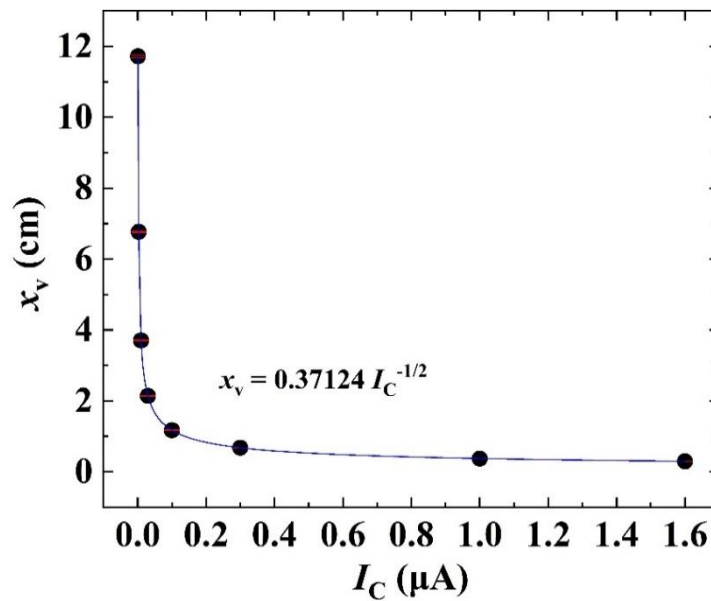


图 9 加热温度保持不变时，虚拟阴极宽度随电子收集电流的变化趋势及其关系拟合。

Fig. 9. The trend of virtual cathode width variation with  $I_C$  and its fitted relationship when  $T$  remains constant.

## 6 结 论

本研究基于一维虚拟阴极理论模型，推导了真空气体虚拟阴极的控制理论，同时建立真空气体虚拟阴极控制系统，并分别研发了对虚拟阴极电势和宽度的控制软件。利用该虚拟阴极控制系统，我们通过改变  $T$  和  $I_C$  的大小，对钨阴极产生的虚拟阴极大小进行了控制研究。研究表明，在控制电流比  $\frac{I_C}{I_E}$  保持不变时，虚拟阴极电势会随着  $T$  的增加而线性增大，并且当  $T$  保持不变时，虚拟阴极电势会随着  $I_C$  的增大呈对数减少；另一方面，在满足强虚拟阴极条件 ( $\frac{I_C}{I_E} \leq 0.00024$ ) 时，虚拟阴极宽度与  $T^{\frac{3}{4}}$  成正比，与  $\sqrt{I_C}$  成反比，而与阴极材料属性无关。该研究结论适用于非外加电场中热阴极产生的虚拟阴极大小调控，并且本研究中针对虚拟阴极宽度的控制方法也需要同时满足强虚拟阴极条件。真空气体虚拟阴极控制理论及其系统的建立不仅是虚拟阴极研究的重要内容，同时也能够为今后虚拟阴极准确测量的实现及其推广应用提供重要的指导意义。

### 参考文献：

- [1] Li S H, Li J Q 2021 *Vacuum* **192** 110496
- [2] Li J Q, Xie X Y, Li S H, Zhang Q H 2022 *Vacuum* **200** 111013
- [3] Li J Q, Li S H, Ma H J 2024 *Phys. Scr.* **99** 055974
- [4] Li J Q, Li S H 2024 *J. Appl. Phys.* **136** 105105
- [5] Hai J, Li J Q, Zhang Z J, Wang H H 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 247901 (in Chinese)
- [海军, 李建泉, 张智娟, 王行行 2025 物理学报 **74** 248901]

- 
- [6] Fan J K, Peng Y, Xu J Q, Xu H, Yang D Q, Li X P, Zhou Q 2019 *Vacuum* **164** 278285
- [7] Hao S M, Nie Z R, Yang J C, Xi X L 2005 *Appl. Surf. Sci.* **251** 097100
- [8] Gaertner G, Barratt D 2005 *Appl. Surf. Sci.* **251** 073079
- [9] Yamaguchi H, Yusa R, Wang G X, Pettes M, Liu F Z, Tsuda Y, Yoshigoe A, Abukawa T, Moody N, Ogawa S 2023 *Appl. Phys. Lett.* **122** 141901
- [10] Tang S, Tang J, Uzuhashi J, Ohkubo T, Hayami W, Yuan J S, Takeguchi M, Mitome M, Qin L C 2021 *Nanoscale Adv.* **3** 27872792
- [11] Chen S G, Wang P T, Zhang X Q Y, Li Z Y, Huang S C, Wang Y, Hu M, Zhang C, Gong Y B 2024 *Appl. Phys. Lett.* **124** 012201
- [12] Zhang X, Li J W, Wang J C, Guo J C, Yee S A 2021 *Opt. Lett.* **46** 45304533
- [13] Sheehan J P, Hershkowitz N. 2011 *Plasma Sources Sci. Technol.* **20** 063001
- [14] Li J Q, Xu J, Bai Y J, Lu W Q, Wang Y N 2016 *J. Vac. Sci. Technol. A* **34** 061304
- [15] Li J Q, Lu W Q, Xu J, Gao F, Wang Y N 2018 *Vacuum* **155** 566571
- [16] Li J Q, Ma H J, Lu W Q 2024 *Chin. Phys. B* **33** 045205
- [17] Li J Q 2024 *Emissive Probes: Principles, Devices and Applications* (Tianjin: Tianjin University Press) pp 83-113 (in Chinese) [李建泉 2024 发射探针：原理、装置及应用（天津：天津大学出版社）pp 83-113]
- [18] Davis H A, Bartsch R R, Thode L E, Sherwood E G, Stringfield R M 1985 *Phys. Rev. Lett.* **55** 2293
- [19] Benford J, Sze H, Woo W, Harteneck B 1986 *Phys. Rev. Lett.* **56** 344346
- [20] Frolov N S, Kurkin S A, Koronovskii A A, Hramov A E, Rak A O 2018 *Appl. Phys. Lett.* **113** 023503

- 
- [21] Jiang W H, Kristiansen M 2001 *Phys. Plasmas* **8** 37813787
- [22] Su D, Deng L K, Wang B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 235204 (in Chinese) [苏东, 邓立科, 王斌 2014 物理学报 **63** 235204]
- [23] Yip C S, Jin C Y, Zhang W, Xu G S, Hershkowitz N, Severn G 2020 *Plasma Sources Sci. Technol.* **29** 115021
- [24] Ma T B, Kalenkovich Y, Rokach V, Osipov A 2025 *Plasma Sci. Technol.* **27** 015403
- [25] Boozer A H 2005 *Rev. Mod. Phys.* **76** 1071
- [26] Compton K T, Langmuir I 1930 *Rev. Mod. Phys.* **2** 123–242
- [27] Langmuir I, Compton K T 1931 *Rev. Mod. Phys.* **3** 191–257

录用稿件，非最终出版稿



---

# Research on control methods of virtual cathode in a vacuum\*

LI Jianquan<sup>1)2)†</sup> WANG Mingzhe<sup>1)2)</sup> HU Wenhao<sup>1)2)</sup> LI Hao<sup>1)2)</sup>

1) (*Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power  
University, Baoding 071003, China*)

2) (*Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power  
University, Baoding 071003, China*)

## Abstract

As an important physical phenomenon caused by thermionic emission, the virtual cathode not only has significant scientific research value, but also has broad application prospects. In our recent research, a one-dimensional model of thermionic emission was established, and the analytical expressions for the potential barrier and the spatial width of virtual cathodes were derived, which were of great significance for improving the understanding of virtual cathodes and developing methods to control the virtual cathode characteristics. In this study, based on the existing theoretical, we further establish a control theory of virtual cathodes and develop a complete virtual cathode control system accordingly. The hardware components of this control system mainly include a vacuum chamber, a hot-cathode filament, an anode, a capture card, a computer, a cathode heating circuit, a cathode scanning bias circuit, and an infrared temperature measurement system, etc. Using the control system, it is possible to achieve accurate control of the virtual cathode potential and width in a vacuum by adjusting parameters such as the cathode heating temperature and the electron collection current. Taking a tungsten filament as the research object, the virtual cathode potential and width generated by the tungsten cathode were measured and controlled respectively by using the method of controlling variables. The experimental results show that the virtual cathode potential increases linearly with the rising heating temperature when the ratio of electron

---

collection current to saturated electron emission current is kept constant, and decreases logarithmically with the increase of the electron collection current when the heating temperature remains constant. On the other hand, when the strong virtual cathode condition is met, the virtual cathode width is proportional to the three-fourths power of the heating temperature, inversely proportional to the square root of the electron collection current, and is independent of the cathode material parameters.

**Keywords:** virtual cathode, heating temperature, saturation electron emission current, electron collection current

---

\* Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2026MS142).

† Corresponding author E-mail: liHjianquan@163.com

录用稿件，非最终出版稿