

# 热阴极逸出功非均匀性对本征发射度的影响

彭宇飞, 秦 臻, 陈弹蛋, 刘 平, 李天涛, 向 军, 赵 伟,  
陈 欣, 杨 洁, 黄 刚, 李建北, 龙继东, 石金水  
(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川绵阳 621999)

**摘 要:** 热阴极广泛应用于真空电子器件、加速器、自由电子激光等各类束流装置, 热阴极表面状态非均匀性对束流本征发射度有着显著的影响. 本文推导了非均匀发射阴极的均方根本征发射度理论形式, 并分析了逸出功非均匀性及其统计效应对本征发射度的影响. 针对逸出功径向和一维余弦分布模型, 计算了均方根发射度与逸出功非均匀性关系的理论数值解; 基于有限差分法粒子仿真技术, 开发了专用于阴极仿真的程序 YY-PICMC, 并验证了理论形式的正确性; 针对逸出功二维余弦分布模型进行了理论和仿真分析, 结果表明逸出功分布空间频数对均方根发射度涨落有显著影响, 当空间频数趋于无限大时, 发射度增长系数趋于 1, 即逸出功均匀阴极的情形; 最后, 分析了最接近真实阴极表面状态的二维逸出功随机分布模型, 仿真结果表明随着空间频数增加, 发射度增长系数统计方差逐渐减小, 符合余弦模型结果的预期. 本文建立的理论形式和仿真方法可以用于评估各类阴极表面逸出功空间非均匀性特征对束流本征发射度的影响程度.

**关键词:** 阴极电子学; 热阴极; FDTD; PIC; 本征发射度; 逸出功分布

**中图分类号:** TL503.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)03-0643-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.03.018

## Intrinsic Emittance of Thermionic Cathode with Work Function Variation

PENG Yu-fei, QIN Zhen, CHEN Dan-dan, LIU Ping, LI Tian-tao, XIANG Jun, ZHAO Wei,  
CHEN Xin, YANG Jie, HUANG Gang, LI Jian-bei, LONG Ji-dong, SHI Jin-shui  
(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621999, China*)

**Abstract:** Surface non-uniformity including temperature, work and geometric profile affect intrinsic emittance of thermionic cathode of vacuum electronics and accelerators. In order to understand how intrinsic emittance is manipulated by work function variation, a general intrinsic emittance model consisting of contributions from surface non-uniformity was developed. Finite-difference time-domain particle-in-cell (FDTD-PIC) simulation verified numerical calculation result of cathodes with work function radical variation and 1D cosine periodic variation. Furthermore, theoretical results and simulation for cathodes with work function of 2D cosine periodic variance and 2D random distribution showed that emittance increase coefficient approaches to 1 and variance of emittance increase coefficient decreased quickly when spatial frequency increased. This paper shows that work non-uniformity hardly affects intrinsic emittance if cathode diameter is much larger than the average size of micro work region; in contrast, intrinsic emittance may differ from uniform case notably if micro size is comparable to cathode diameter. Moreover, theoretical model and simulation method are useful to assess influence of work or temperature non-uniformity on intrinsic emittance of kinds of cathode.

**Key words:** cathode electronics; thermionic cathode; FDTD; PIC; intrinsic emittance; work function variation

## 1 引言

热阴极广泛应用于高功率微波以及各类真空电子器件、加速器、自由电子激光等. 为了获得优良的装置性

能并且可靠、长时间运行, 一般要求更低的发射度和更高的亮度<sup>[1,2]</sup>. 其中, 阴极的本征发射度是束流发射度的重要组成之一.

实际阴极表面存在种种非均匀特征, 比如温度分

布、逸出功分布,粗糙度等<sup>[3-6]</sup>.表面非均匀性可能引起发射度增加、亮度降低甚至束流不稳定性,导致器件性能下降、失效或寿命显著缩短<sup>[7]</sup>.但是,由于热发射材料表面状态的复杂性,表面非均匀性对发射度的影响研究十分缺乏.Jensen<sup>[8]</sup>等人基于热场致发射模型的仿真结果表明逸出功分布等非均匀性引起发射度增长,其中逸出功分布引起发射度增长10~60倍.其结果针对特定区域逸出功分布仿真得出,未能系统分析逸出功对发射度的影响,但从其结果可知,逸出功非均匀性对发射度的影响非常显著,具有重要的研究意义.

本文从热发射理论出发,研究了非均匀发射热阴极的均方根本征发射度的理论形式.针对宏观径向分布和一维余弦分布模型,基于有限差分法(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)粒子仿真技术(Particle-In-Cell, PIC)对理论结果进行了验证.结合理论分析和数值仿真,研究了二维周期和随机分布模型下逸出功分布对发射度的影响,并针对具体应用案例进行了分析.

## 2 非均匀发射热阴极均方根发射度的理论研究

首先,参考热阴极发射电流密度的导出过程<sup>[9,10]</sup>,在相空间统计所发射的电子,最终得到了包括温度与逸出功非均匀特征的归一化均方根发射度理论模型.

### 2.1 束流均方根发射度的基本定义

粒子束的均方根发射度定义如式(1),其求矩方法如式(2),经变换得到以动量矩和位置矩描述的均方根发射度如式(4).其中: $f$ 为相空间概率密度分布函数, $O_{(x,p_x)}$ 为包含位置与动量变量的待求矩变量, $m$ 为电子质量, $c$ 为光速.

$$\varepsilon_{rms} = \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2} \quad (1)$$

$$\langle O \rangle = \frac{\iint dx dp_x O_{(x,p_x)} f_{(x,p_x)}}{\iint dx dp_x f_{(x,p_x)}} \quad (2)$$

$$x' = \frac{\Delta x}{\Delta z} \approx \frac{v_x}{v_z} \approx \frac{\hbar k_x}{\beta \gamma m c} = \frac{p_x}{\beta \gamma m c} \quad (3)$$

归一化均方根发射度为:

$$\varepsilon_{n,rms} = \beta \gamma \varepsilon_{rms} = \frac{1}{m c} \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle p_x^2 \rangle - \langle x p_x \rangle^2} \quad (4)$$

### 2.2 非均匀发射热阴极均方根发射度理论模型

由于非均匀性特征的存在,推导电子的位置和动量二阶矩需要从最基本的求矩定义出发.金属单位体积内自由电子按动量分布如式(5).其中 $x-y$ 为阴极平面, $z$ 为阴极法线方向.

$$dn_p = \frac{2}{h^3} \times \frac{dp_x dp_y dp_z}{\exp\left[\frac{(p_x^2 + p_y^2 + p_z^2)/2m - E_F}{k_B T}\right] + 1} \quad (5)$$

对于热发射,一般有: $p_z^2/(2m) - E_F > k_B T$ ,其中 $E_F$ 为费米能级, $k_B$ 为玻尔兹曼常数,式(6)近似为:

$$dn_p = \frac{2}{h^3} e^{\frac{E_F}{k_B T}} e^{-\frac{p_x^2}{2mk_B T}} e^{-\frac{p_y^2}{2mk_B T}} e^{-\frac{p_z^2}{2mk_B T}} dp_x dp_y dp_z \quad (6)$$

类似发射电流密度的导出过程,我们得到单位时间、单位阴极面积上发射出的 $x$ 方向动量在 $p_x$ 和 $p_x + dp_x$ 之间的电子数为:

$$dn_{p_x} = \frac{2D}{mh^3} \times e^{\frac{E_F}{k_B T}} e^{-\frac{p_x^2}{2mk_B T}} dp_x \int_{p_x}^{\infty} e^{-\frac{p_z^2}{2mk_B T}} p_z dp_z \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{p_y^2}{2mk_B T}} dp_y \quad (7)$$

其中, $p_{z0} = mv_{z0} = (2mW_a)^{1/2}$ , $W_a$ 为表面势垒高度.透射系数 $D$ 近似取1,积分得到:

$$dn_{p_x} = \frac{2}{h^3} \sqrt{2\pi mk_B^3} T^{3/2} e^{-\frac{\phi_0}{k_B T}} \cdot e^{-\frac{p_x^2}{2mk_B T}} dp_x \quad (8)$$

因此,单位时间,位置在 $x \sim (x + dx)$ 范围内, $y$ 方向单位长度内,动量在 $p_x$ 和 $p_x + dp_x$ 间的热发射电子数为:

$$dn_{(x,p_x)} = f_{(x,p_x)} dp_x dx \quad (9)$$

其中,热电子的分布函数为:

$$f_{(x,p_x)} = \frac{2}{h^3} \sqrt{2\pi mk_B^3} T^{3/2} e^{-\frac{\phi_0}{k_B T}} \cdot e^{-\frac{p_x^2}{2mk_B T}} \quad (10)$$

根据式(2),对圆形阴极,求矩形式为:

$$\langle O \rangle = \frac{\int_0^R dr \int_0^{2\pi} r d\theta \int_{-\infty}^{\infty} dp_x \cdot O_{(x,p_x)} T^{3/2} e^{-\frac{\phi_0}{k_B T}} \cdot e^{-\frac{p_x^2}{2mk_B T}}}{\sqrt{2\pi mk_B} \int_0^R dr \int_0^{2\pi} r d\theta \cdot T^2 e^{\frac{\phi_0}{k_B T}}} \quad (11)$$

均方根发射度各分量简化后的形式为:

$$\langle x^2 \rangle = \frac{\int_0^R dr \int_0^{2\pi} r d\theta \cdot (r \cos\theta)^2 T^2 e^{-\frac{\phi_0}{k_B T}}}{\int_0^R dr \int_0^{2\pi} r d\theta \cdot T^2 e^{-\frac{\phi_0}{k_B T}}} \quad (12)$$

$$\langle p_x^2 \rangle = \frac{mk_B \int_0^R dr \int_0^{2\pi} r d\theta \cdot T^3 e^{-\frac{\phi_0}{k_B T}}}{\int_0^R dr \int_0^{2\pi} r d\theta \cdot T^2 e^{-\frac{\phi_0}{k_B T}}} \quad (13)$$

$$\langle x p_x \rangle = \sqrt{\frac{2mk_B}{\pi}} \frac{\int_0^R dr \int_0^{2\pi} r d\theta \cdot (r \cos\theta) T^{5/2} e^{-\frac{\phi_0}{k_B T}}}{\int_0^R dr \int_0^{2\pi} r d\theta \cdot T^2 e^{-\frac{\phi_0}{k_B T}}} \quad (14)$$

其中,温度、功函数是空间甚至时间的函数,对应于空间非均匀性发射和随时间的演化.式(4)和式(12)~(14)一起构成了热阴极温度与功函数非均匀发射的一般性模型.

### 2.3 逸出功非均匀模型

几乎所有热阴极的表面逸出功都是不均匀分布的(单晶除外).根据经典数学描述<sup>[11,12]</sup>,以及阴极表面逸出功随机非均匀的实际特征<sup>[4,9]</sup>,任意给定的随机分布,特别是准周期分布,都可以采用三角函数级数来完备表述,如式(15):

$$\phi = \phi_0 \left( 1 + \sum_{i=1}^n C_{\phi,i} \cos(\omega_{\phi,i}x + \phi_{\phi,x,i}) \cos(\omega_{\phi,i}y + \phi_{\phi,y,i}) \right) \quad (15)$$

其中,  $C_{\phi,i}$  为空间分布频率  $\omega_{\phi,i}$  对应的逸出功涨落幅度,  $\phi_{\phi,x,i}$  为随机相位, 其中  $\phi_0$  为逸出功分布的参考值. 对于圆形阴极,  $\omega_{\phi,i} = k\pi/R$ , 其中  $k$  为空间频数, 为阴极内逸出功分布周期的数量,  $k > 0$ . 后续为了分析方便, 采用频数来描述空间分布特征, 其意义和频率是相当的.

逸出功空间频数  $k$  是理论计算和仿真中的重要参数, 反映了逸出功微区尺寸和整个阴极尺寸的比较关系,  $k$  越大, 说明微区尺寸相对阴极尺寸越小; 反之, 逸出功特征区域和阴极尺寸相当. 例如, 大面积热阴极的直径达到约 100mm, 晶粒尺寸在 1 ~ 10 $\mu$ m 尺寸, 相当于频数极高的情形. 而微聚焦束流器件中采用的阴极直径只有 0.1mm, 微波器件阴极直径约为 3mm, 都相当于空间频数较低的情形.

为了获得逸出功分布影响发射度的规律性变化趋势, 后文对式(15)进行简化或者类比描述, 分别得到径向宏观分布、一维周期分布, 以及二维周期分布的逸出功表达形式.

### 3 逸出功分布影响均方根发射度的仿真实验

为验证上述理论模型的正确性, 并分析各种不易解析描述的非均匀性模型, 需要借助粒子仿真方法. FDTD-PIC 是最常用的带电粒子与电磁场耦合运输的仿真方法之一, 关于 FDTD-PIC 的原理、流程和特点可参考前人文献<sup>[13,14]</sup>.

本研究采用自行开发的专用于阴极发射研究的 FDTD-PIC 程序 YY-PICMC, 基本设置如下: 忽略磁场, 麦克斯韦方程简化为泊松方程, 即采用静电场模型代替全电磁模型; 空间离散采用笛卡尔坐标离散形式; 采用有限大小粒子模拟, 电荷密度分配采用 PIC 权重法.

本研究中, 分析非均匀性发射的具体方法与过程如下: 仿真的几何模型为相对的平面阴、阳电极, 其中热阴极为圆形, 阴极面上每个网格内的逸出功根据给定数学形式的分布模型进行设置, 或者根据平均微区尺寸和方差进行随机抽样. 电子以热速度从阴极表面发射, 在电场的作用下不断推进并到达阳极, 在阳极上进行发射度、焦斑和流强等参数统计.

#### 3.1 逸出功径向分布模型

对于直径约 100mm 的大面积热阴极, 由于烧结等工艺过程中均匀性难以保证, 表面逸出功整体上是均匀的; 此外, 热子加热不均匀也会引起阴极表面不同位置逸出功变化不一; 工艺和使用过程导致大面积热阴极逸出功的宏观分布, 可以用径向-角向分布来描述. 简单起见, 先将大面积热阴极表面逸出功的分布假定

为沿径向弱余弦分布, 如式(16), 其中  $R$  为阴极半径.

$$\phi = \phi_0 \left[ 1 + C_{\phi} \cos\left(\frac{\pi}{2R}r\right) \right] \quad (16)$$

$$\eta_e = \varepsilon_{nu}(T, \phi) / \varepsilon_u(T_0, \phi_0) \quad (17)$$

参考逸出功  $\phi_0 = 2.66\text{eV}$  (硼镧阴极), 参考工作温度  $T_0 = 1800\text{K}$ . 为分析方便, 定义非均匀发射与均匀发射 ( $C_{\phi} = 0$ ) 的均方根发射度比值  $\eta_e$  为发射度增长系数 (Emittance Increase Coefficient, EIC), 如式(17), 其中  $C_{\phi}$  为逸出功的非均匀性系数 (Non-uniformity Coefficient, NuC). 采用数值积分方法和 FDTD-PIC 数值仿真分别得到发射度增长系数随非均匀系数  $C_{\phi}$  的关系, 结果如图 1.

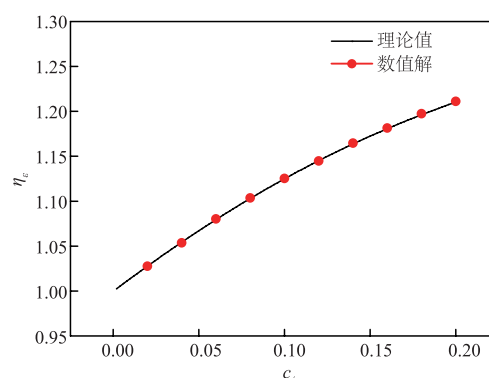


图1 径向逸出功分布EIC随NuC的变化关系

结果表明: 对于逸出功径向余弦分布模型, EIC 随非均匀系数增大逐渐增加, 10% 的非均匀性引起均方根发射度变化为 12.5%, 这是由于电子发射更集中在阴极边缘.

因此, 对于大面积阴极, 宏观非均匀性会引起本征发射度显著变化, 在设计中要考虑非均匀性带来的发射度涨落. 如需获得均匀的发射, 应改进阴极烧结炉内的温度均匀性, 同时改进加热热子的绕制形式和阴极外缘的隔热设计, 保证阴极活性物质的消耗在阴极面上尽量均匀. 也可以采用小阴极面阵列来避免大面积热阴极的制备工艺难度.

#### 3.2 逸出功一维周期分布模型

一般的, 热阴极表面由多个形状不规则、逸出功不同的微区构成. 各类常见应用中, 热阴极尺寸分布在 0.01 ~ 10mm 范围, 多晶阴极材料的晶粒 (微区) 尺寸约为 1 ~ 10 $\mu$ m, 因此表面逸出功呈现准周期特征的随机分布, 其中频数  $k$  的范围约为 1 ~ 10000. 简单起见, 可以采用一维余弦分布模型 (如式(18)) 来验证逸出功微观分布的频数特征对本征发射度的影响规律.

$$\phi = \phi_0 \left[ 1 + C_{\phi} \cos\left(k_x \cdot \frac{\pi}{R}x\right) \right] \quad (18)$$

数值计算和 FDTD-PIC 仿真结果如图 2 所示, 对于阴极逸出功一维周期分布, 随着阴极面内逸出功空间

频数的增加, EIC 逐渐趋于 1, 即逸出功均匀阴极的情形, 这是由于随着频数的增加, 单个周期内发射电子对总的发射度的贡献不断降低; 对于  $C_\phi = 0.2$ , 当  $k_x > 6$  以后, EIC 的涨落就低于 10% 了。

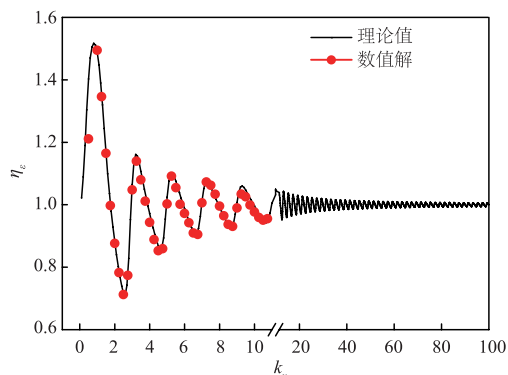


图2 一维余弦周期分布EIC随 $k_x$ 的变化关系( $C_\phi=0.2$ )

上述两种模型的仿真结果和理论模型计算结果符合良好, 验证了非均匀发射度理论计算方法的正确性。

## 4 逸出功二维微观分布影响均方根发射度的仿真分析

### 4.1 逸出功二维余弦周期分布对均方根发射度的影响

对于常用的平多晶面热阴极, 逸出功呈现二维准周期随机分布. 简单起见, 先采用二维余弦周期分布来考察逸出功分布的空间频数对发射度的影响, 表达如式(19), 其逸出功分布如图3( $k=10$ ). 相空间密度分布如图4, 周期性的逸出功分布引起了相空间分布的规则分裂. 分裂数的变化则导致了 EIC 涨落, 如图5 所示。

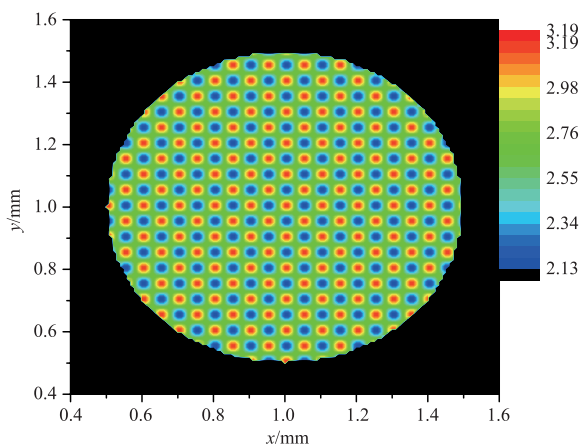


图3 逸出功二维余弦分布( $k=10$ )

结果表明: 在温度限制发射状态下, 与一维情形类似, 随着空间频数  $k$  的增加, 微区尺寸相对于阴极尺寸越来越小, EIC 迅速收敛于 1, 逸出功非均匀性不会引起发射度的显著涨落; 而空间频数  $k$  较小时, 逸出功微区

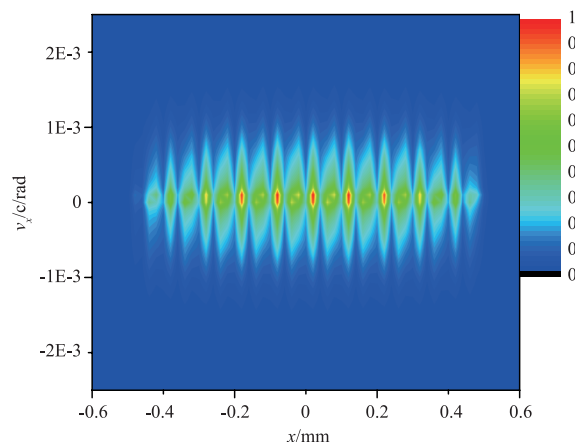


图4 余弦分布下相空间分布( $k_x=10$ )

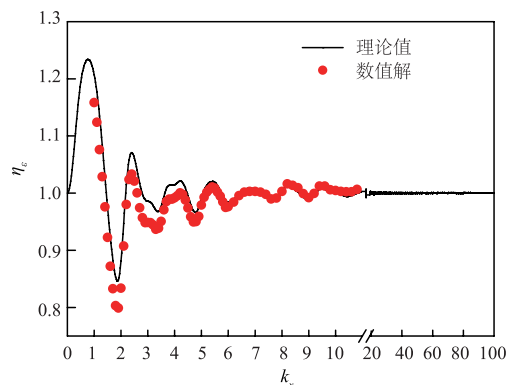


图5 发射度增长系数随频数的变化

尺寸和阴极尺寸相当, 发射度的涨落就很明显: 对于  $C_\phi = 0.2$ ,  $k < 5$  时发射度差异可以达到约 5%。因此, 在制备小面积多晶热阴极时, 应当控制球磨后的粉料直径, 并控制烧结温度和时间, 尽量增大表面逸出功涨落的空间频数。

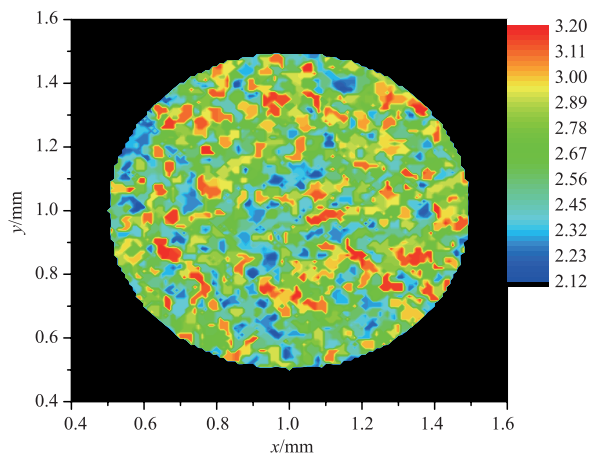
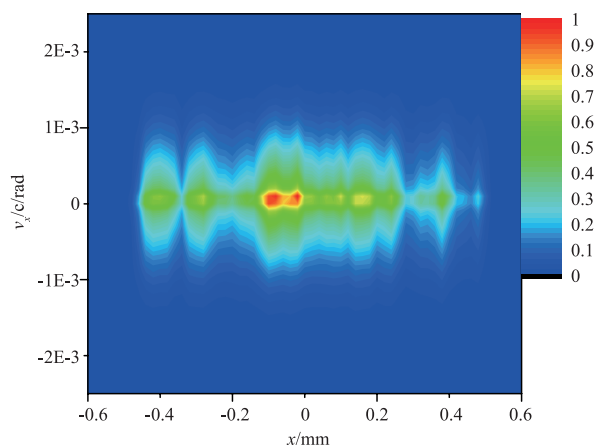
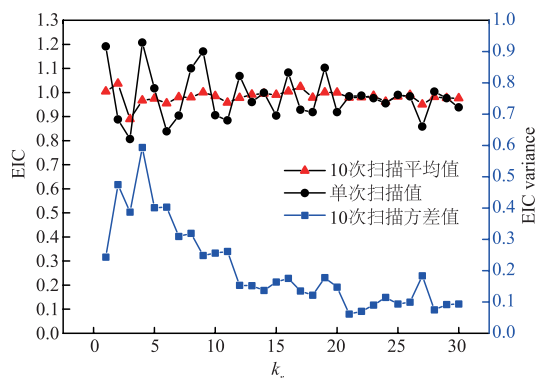
$$\phi = \phi_0 \left[ 1 + C_\phi \cos\left(k \cdot \frac{\pi}{R}x\right) \cos\left(k \cdot \frac{\pi}{R}y\right) \right] \quad (19)$$

### 4.2 逸出功二维随机分布对均方根发射度的影响

为了进一步了解真实逸出功分布特征对实际热阴极均方根发射度的影响, 采用随机抽样生成圆形阴极的逸出功分布, 在相同的设置下多次扫描发射度增长系数和频数的相关性。

其中, 逸出功微区面积为正态分布, 微区逸出功在  $2.66 \times (1 - 20\%) \text{ eV} \sim 2.66 \times (1 + 20\%) \text{ eV}$  之间均匀随机抽样. 阴极直径与微区平均尺寸的比值为频数:  $k_r = 2R/a$ , 其中  $a$  为单次抽样的逸出功微区平均尺寸. 某次随机生成的逸出功分布模型和仿真得到的相图分布如图6 和图7( $k_r = 30$ ). 发射度增长系数的单次值、平均值(每个频数点统计 10 次)和方差随空间频数的变化关系如图 8。

结果表明, 随着频数的增加, 单轮扫描的仿真涨落逐渐减小, 多轮扫描的方差逐渐减小,  $k_r$  为 30 时统计方

图6 功函数二维随机分布 ( $k_r=30$ )图7 某随机分布下归一化相空间分布 ( $k_r=30$ )图8 EIC单次值、平均值和方差随 $k_r$ 的变化

差已经小于 10%；该结果与余弦分布下 EIC 涨落幅度随频数增加不断衰减的物理意义是一致的。

因此, Jensen 等人在针对真实阴极的逸出功分布进行仿真时, 仿真所用的阴极局部尺寸和逸出功的微区尺寸相当, 其结果相当于本仿真中  $k_r < 5$  的情形, 从图 9 可以看出, 低频数下发射度增长系数涨落明显, 当低逸出功区明显偏离阴极中心时, 很容易得到巨大的发射

度增长系数。

同理, 对直径大于 3mm 的多晶阴极, 比如直线感应加速器等装置中的大面积热阴极, 逸出功宏观分布对本征发射度的影响是主要的. 而对于直径小于 1mm 的多晶阴极, 比如微焦电子束器件、微波器件等所用的小面积热阴极, 除了宏观非均匀性, 逸出功的微观分布对发射度的影响也比较显著, EIC 涨落在 1% ~ 10% 量级。

## 5 结论

本文研究了非均匀发射阴极本征均方根发射度的理论形式, 并基于有限差分法粒子仿真技术 (FDTD-PIC) 针对逸出功径向分布和一维余弦周期分布模型验证了理论形式的正确性. 针对热阴极表面逸出功的实际分布特征, 仿真研究了二维逸出功余弦周期分布和随机分布下发射度增长系数随非均匀性空间频数的关系. 结果表明, 在温度限制发射状态下, 当阴极尺度和逸出功微区尺寸相当时, 非均匀性对发射度影响显著; 当阴极尺度远大于逸出功微区尺寸时, 逸出功非均匀性不会引起发射度的显著涨落. 在设计束流装置时, 应考虑逸出功非均匀性引起的本征发射度增长, 并有效控制阴极制备工艺参数。

需要注意的是, 本文研究方法及结论存在一定局限性. 比如数值仿真过程中采用的是泊松方程, 而非麦克斯韦方程, 未考虑热子剩余磁场以及强流电子束自磁场的影响, 与真实情况有一定差异。

下一步将在本研究的基础上继续深入: 通过表面分析技术获得阴极表面逸出功微区尺寸的统计抽样特征, 完善仿真程序中的逸出功随机生成模型, 并与发射度实验测量结果进行比较分析。

## 参考文献

- [1] Pedersen A, Manolescu A, Valfells A. Space-charge modulation in vacuum microdiodes at THz frequencies[J]. Physical Review Letters, 2010, 104(17): 175002.
- [2] Jensen K L, Shiffler D A, Petillo J J, et al. Emission, surface structure, and electron emission[J]. Phys Rev St Accel Beams, 2014, 17(4): 1-1.
- [3] 程诚, 程道喜, 郑曙昕, 等. 新型热阴极电子枪加热结构热分析[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(7): 1607-1609. Cheng Cheng, Cheng Dao-xi, Zheng Shu-xin, et al. Thermal analysis of heating structure for thermionic cathode electron gun[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(7): 1607-1609. (in Chinese)
- [4] 张德政. 行波管阴极的显微研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2007. 6-7. Zhang De-zheng. Microscopic Study of TWT Cathode[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology

- of China, 2007. 6 – 7. (in Chinese)
- [5] Jensen K L, Lau Y Y, Nicholas, et al. Emission nonuniformity due to profilometry variation in thermionic cathodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(16): 164105.
- [6] 刘冬梅. 低温大电流密度阴极技术研究 [A]. 中国电子学会真空电子学会第十三届学术年会论文集(下) [C]. 北京: 中国真空电子学会, 2001. 241 – 248.
- [7] Simmons D F, Fortgang C M, Holtkamp D B. Using multi-spectral imaging to measure temperature profiles and emissivity of large thermionic dispenser cathodes [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 76(4): 044901.
- [8] Jensen K L, Petillo J J, Montgomery E J, et al. Application of a general electron emission equation to surface nonuniformity and current density variation [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B Microelectronics & Nanometer Structures*, 2008, 26(2): 631 – 837.
- [9] 林祖伦, 王小菊. 阴极电子学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013. 5 – 15.  
Lin Zu-lun, Wang Xiao-ju. *Cathode Electronics* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. 5 – 15. (in Chinese)
- [10] 彭宇飞, 秦臻, 张篁, 等. 热阴极径向温度非均匀性对本征发射度的影响 [J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30(03): 30035101.  
Peng Yu-fei, Qin Zhen, Zhang Huang, et al. Intrinsic emittance of thermal cathode with radial temperature variation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30(03): 30035101. (in Chinese)
- [11] 数学手册. 数学手册编写组 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. 532 – 533.
- [12] A. M. Tron. Photo cathode roughness impact on photo gun beam characteristics [A]. *Proceedings of EPAC 2006* [C]. Mulhouse: European Physical Society, 2006. 121 – 123.
- [13] 王小菊. 场发射阴极的计算机模拟 [D]. 成都: 电子科技大学, 2006. 19 – 25.

Wang Xiao-ju. *Computer Simulation of Field Emission Cathode* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006. 19 – 25. (in Chinese)

- [14] 周俊. 电磁粒子模拟方法及其应用研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009. 18 – 94.  
Zhou Jun. *Research on Electromagnetic Particle Simulation Method and Its Application* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009. 18 – 94. (in Chinese)

#### 作者简介



彭宇飞(通信作者) 男, 1985 年 10 月出生, 湖南株洲人. 2007 年和 2010 年分别在清华大学和中国工程物理研究院获工学学士和硕士学位, 现在在职博士生. 主要从事加速器和电真空物理与技术研究.

E-mail: bangyf03@163.com



秦臻 男, 1988 年 10 月出生, 四川成都人. 2011 年和 2014 年在电子科技大学分别获工学学士和硕士学位, 现在在中国工程物理研究院流体物理研究所工作. 主要从事电真空及阴极物理和技术方面研究.

E-mail: qzqinzen@foxmail.com



陈弹蛋 男, 1977 年 4 月出生, 四川资阳人. 1999 年大学本科毕业于电子科技大学通讯与信息工程学院无线电技术专业, 2011 年在电子科技大学光电信息学院电子与通信工程专业获硕士学位. 主要从事微波器件和电真空物理与技术研究.

E-mail: 49416404@qq.com