

空间电荷效应对热场致发射中诺廷汉效应的影响*

左应红^{1)2)†} 王建国¹⁾ 范如玉¹⁾²⁾

1) (西北核技术研究所, 西安 710024)

2) (清华大学工程物理系, 北京 100084)

(2013 年 9 月 3 日收到; 2013 年 9 月 23 日收到修改稿)

热场致发射阴极所产生的强流电子束具有很强的空间电荷效应, 为研究该效应对热场致发射过程中诺廷汉 (Nottingham) 效应的影响机理, 在理论分析的基础上, 用数值方法研究了不同逸出功和多个外加电场条件下考虑空间电荷效应对诺廷汉效应结果的影响, 并与不考虑空间电荷效应时的情形进行了对比. 结果表明: 空间电荷效应的强弱会显著影响到阴极表面的稳态电场, 进而对诺廷汉效应产生不可忽略的影响; 当逸出功在 3.0—4.52 eV、外加电场在 3×10^9 — 9×10^9 V/m 范围内时, 考虑空间电荷效应的影响后, 热场致发射电子所带走的平均能量较不考虑空间电荷效应时增加 0—2.5 eV, 且温度越高或外加电场越大时, 该增加值越大; 考虑空间电荷效应对诺廷汉效应的影响后, 热场致发射电子从阴极带走的平均能量随外加电场的增加呈非线性下降规律; 当阴极表面温度较高时, 诺廷汉效应中的冷却效应随二极管间隙距离的变大而增强.

关键词: 热场致发射, 诺廷汉效应, 空间电荷效应, 阴极表面电场

PACS: 79.70.+q, 52.59.Sa, 85.30.Fg

DOI: 10.7498/aps.62.247901

1 引言

热场致发射阴极具有能在真空环境中长时间提供稳定电流和产生强流电子束等优点, 因此这类阴极得到了快速发展, 在高功率微波 (HPM) 源器件研制、电子束材料改性试验、闪光 X 射线照相技术等领域有广泛的应用^[1–3]. 热场致发射过程中, 阴极表面伴随着一系列复杂的物理过程, 包括电阻性焦耳加热、热传导、热辐射及诺廷汉 (Nottingham) 效应等^[4]. 其中诺廷汉效应作为热场致发射过程中的重要热电物理现象之一, 受到了众多研究人员的关注.

诺廷汉效应是指在电子发射过程中, 由于发射出电子本身带走的能量与阴极发射体内电子的费米能量之间存在着差异, 从而由于电子发射过程引起对发射体的加热或者冷却效应, 这种效应的强弱和阴极发射体表面温度、阴极表面电场及阴极材料属性等都有密切关系^[5]. Bergeret^[6]的工作采用

尖端发射体实验研究了铌超导体中的诺廷汉效应, 并发现在特定条件下, 由于诺廷汉效应的存在和发展, 会破坏铌阴极发射体的超导特性; Paulini 等^[7]通过数值方法研究了在一定外加电场和逸出功范围内的热场致发射电流密度与诺廷汉效应, 并拟合得到了计算诺廷汉效应的经验公式; Rossetti 等^[8]在计算爆炸电子发射延迟时间时考虑了诺廷汉效应对阴极表面微凸起热不稳定性的影响.

由于热场致发射过程中产生的电流密度达 10^{12} A/m² 甚至更高, 因此阴极发射出电子的空间电荷效应会显著影响阴极表面电场和热场致发射电流密度的大小^[9–11], 进而也会对诺廷汉效应产生重要影响. 空间电荷效应会限制二极管阴极的发射电流, 它与二极管运行特性有密切关系, 因此热场致发射过程中的空间电荷效应是设计高功率微波源等强流电子束器件时需要考虑的重要方面^[9,10–12]. 上述的研究工作^[5–8]在计算诺廷汉效应时, 均忽略了热场致发射过程中空间电荷效应的影响. 为了探究空间电荷效应影响诺廷汉效应的物

* 国家自然科学基金 (批准号: 61231003) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zuoyinghong@tsinghua.org.cn

理机理, 本文通过理论分析, 并利用数值方法研究了热场致发射过程中空间电荷效应对诺廷汉效应的影响.

2 热场致发射过程中的诺廷汉效应

要得到热场致发射发射出电子所带走的平均能量, 则需先确定热场致发射的电流密度. 热发射、场致发射以及热场致发射理论已被一些作者深入研究过^[7,13-16], 描述热场致发射电流密度 j_{TEF} 的一般表达形式如下:

$$j_{\text{TEF}} = e \int_{-\infty}^{\infty} P_w(W_x, E, T, \phi_w) dW_x, \quad (1)$$

式中, e 是电子电荷量, W_x 是电子在与发射体表面垂直方向上的能量, E 是阴极表面的电场, T 是阴极表面的温度, ϕ_w 是阴极材料的逸出功.

$$W_x = p^2(x)/2m_e + V(x), \quad (2)$$

式中, $p(x)$ 是电子在与发射体表面垂直方向上的动量, m_e 是电子质量, $V(x)$ 是电子势能. $P_w dW_x$ 则表示电子能量在 $W_x - W_x + dW_x$ 中单位时间内打到单位发射表面上、且能穿透势垒的电子数目, P_w 的表达形式为

$$P_w = N_w(W_x, T, \phi_w) D_w(W_x, E), \quad (3)$$

其中 N_w 是电子供给函数, D_w 为电子隧穿系数.

通常情况下, 假设发射体内电子能量服从费米-狄拉克统计分布, 则在单位时间内发射体表面单位面积上所能提供的电子数目, 亦即电子供给函数 N_w 为

$$N_w(W_x, T, \phi_w) = \frac{4\pi m_e k T}{h^3} \ln \left[1 + \exp \left(-\frac{W_x + \phi_w}{k T} \right) \right], \quad (4)$$

其中 k 为玻尔兹曼常数, h 是普朗克常数. 采用 Wentzel, Kramer 和 Brillouin 提出的 WKB 近似方法, 可以得到电子的透射系数为^[17]

$$D_w(W_x, E) = \frac{1}{1 + \exp(-2i\hbar^{-1} \int_{x_1}^{x_2} p(\xi) d\xi)}, \quad (5)$$

其中, $\hbar = h/2\pi$, 而 x_1 和 x_2 则是使得 $p^2(x)$ 为 0 的两个点, 更详细的过程可参见文献 [13].

要研究热场致发射过程中的诺廷汉效应, 重点在于确定发射出的电子从阴极带走的平均能量, 用

ϵ_n 表示发射出电子从阴极带走的平均能量, 该值也是诺廷汉效应强弱的度量^[7].

$$\epsilon_n = \frac{e}{j_{\text{TEF}}(T, E, \phi_w)} \times \int_{-\infty}^{\infty} E_e P_{E_e}(E_e, T, E, \phi_w) dE_e - \phi_w, \quad (6)$$

其中, $E_e = p^2/2m_e + V$ 是电子的总能量.

3 空间电荷效应的物理模型与分析

空间电荷效应是由于热场致发射产生的电子进入到二极管间隙区而形成. 空间电荷效应与二极管的几何形貌等因素有关^[18,19], 本文基于一维无限大平板二极管模型, 从描述电势与电子电荷密度的约束关系式出发, 可得到泊松方程、能量守恒方程及电流连续性方程为

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (7)$$

$$v^2/2m_e - 0 = e\phi, \quad (8)$$

$$j = -\rho v, \quad (9)$$

其中, ϵ_0 为真空介电常数, ρ 是电子电荷密度, ϕ 为电势, v 是电子在 x 方向的速度. 再利用电势边界条件: 阴极电势 $\phi_{x=0} = 0$ 和阳极电势 $\phi_{x=d} = V_0$, 可导出

$$4k_0 j V_0^{3/2} - 3V_0 E_s^2 = 9k_0^2 j^2 d^2 - 3d|E_s|^3, \quad (10)$$

其中, 参数 $k_0 = \sqrt{m_e/2e}/\epsilon_0$, 二极管间隙距离为 d , 而 E_s 则表示二极管阴极表面的电场,

$$E_s = -(d\phi/dx)|_{x=0}. \quad (11)$$

(10) 式中的 V_0/d 即为二极管间隙区的电场, 亦即阴极表面的外加电场, 该式显示了阴极发射的电流密度 j 与阴极表面电场 E_s 间的非线性约束关系. 由 (10) 式可知, 当热场致发射电流密度确定后, 空间电荷效应主要和二极管的外加电压、间隙距离及外加电场有关. 若将 (10) 式中的电流密度 j 用热场致发射电流密度 j_{TEF} (即 (1) 式) 去替换, 则可据此模型研究热场致发射过程中的空间电荷效应, 进而考虑空间电荷效应对热场致发射过程中诺廷汉效应的影响. 下面重点关注阴极材料逸出功、二极管外加电场及间隙距离等参数.

4 空间电荷效应对诺廷汉效应的影响

4.1 物理与计算模型

基于前述理论分析, 建立如下物理计算模型: 给定二极管外加电压 V_0 , 间隙距离 d , 阴极材料逸出功 φ_w 及阴极表面温度 T 等参数后, 先预估一个阴极表面电场 E_s , 然后根据所给参数及预估的电场计算热场致发射电流密度 j_{TEF} , 再考察得到的 j_{TEF} 是否满足 (10) 式所描述的空间电荷效应约束关系, 若不满足则校正 E_s 后再次计算, 通过反复地预估-校正, 最终获得阴极表面电场的自洽解, 再由该自洽解去计算诺廷汉效应并与不考虑空间电荷效应时的诺廷汉效应结果相比较.

本文的模型中, 阴极材料采用钨金属, 其 $\varphi_w = 4.52$ eV, 通过添加特定的元素如钽, 可以改变钨的逸出功 [20], 因此本文还研究了 $\varphi_w = 3.0$ eV 的情况. 钨的熔点为 3685 K, 所以计算的温度范围为 300—4000 K 之间, 二极管间隙距离 $d = 0.1$ mm, 二极管阳极的电势 $V_0 = Ed$.

4.2 逸出功与外加电场对诺廷汉效应的影响

诺廷汉效应主要是基于发射体自身的特性如逸出功而言, 而空间电荷效应则会受二极管的间隙距离、外加电压、外加电场等参数的影响. 故下面先讨论阴极材料的逸出功及二极管的外加电场等参数对诺廷汉效应的影响.

图 1 是当逸出功为 3.0 和 4.52 eV 时, 外加电场分别为 $3, 5, 7, 9 \times 10^9$ V/m, 且不考虑空间电荷效应的影响时, 计算所得诺廷汉效应与阴极表面温度 T 之间的关系. ϵ_n 表示热场致发射的电子从阴极带走的平均能量. 当 $\epsilon_n > 0$ 时, 表示发射出的电子从阴极带走能量, 诺廷汉效应的结果是冷却阴极, 反之若 $\epsilon_n < 0$, 则表示加热阴极, $\epsilon_n = 0$ 对应的温度为由加热效应过渡到冷却效应的转换温度 T_{inv} .

从图 1 可看出, 大多数温度情况下, $\epsilon_n > 0$, 即诺廷汉效应的冷却效应占主导地位, 加热效应并不明显; 同一温度下, 诺廷汉效应对阴极的冷却效应随外加电场的增强而减弱; 同一外加电场下, 温度越高, 诺廷汉效应的冷却效应越显著; φ_w 不变时,

诺廷汉效应的转换温度 T_{inv} 随外加电场强度的增大而增大. 对比图 1(a) 和 (b) 可看出, 阴极材料 φ_w 变大后, 诺廷汉效应中的冷却效应增强, 且相同外加电场所对应的 T_{inv} 降低.

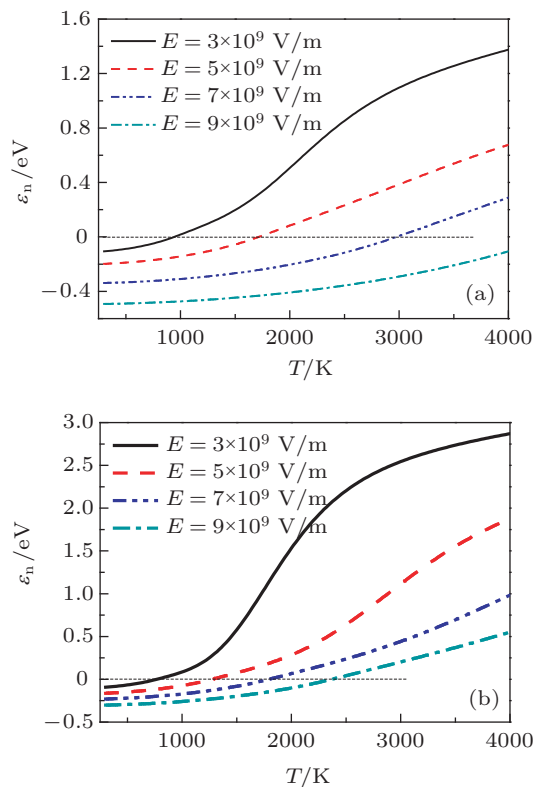


图 1 不考虑空间电荷效应时, 诺廷汉效应与温度的关系 (a) $\varphi_w = 3.0$ eV; (b) $\varphi_w = 4.52$ eV

根据本文建立的空间电荷效应模型, 计算出的阴极表面电场的自洽解 E_{st} , 也称阴极表面电场的稳态解, E_{st} 与阴极表面温度 T 的关系如图 2 所示.

从图 2 可看出, 同一外加电场条件下, 阴极表面温度越高, 则考虑空间电荷效应后阴极表面的稳态电场 E_{st} 越低; 且温度越高, E_{st} 下降速率越快. 这主要是因为温度越高, 热场致发射电流密度相应也高, 使得二极管间隙区的空间电荷效应更加显著, 进而导致 E_{st} 随之下降; 并且在温度较高时, 热场致发射电流密度对温度的变化表现得较为敏感. 当 φ_w 由 3.0 eV 变为 4.52 eV 后, 从图 2(b) 中可看到, 较图 2(a) 的结果而言, 同样的外加电场 E 和温度 T 条件下, 阴极表面的稳态电场 E_{st} 更高, 这是由于 φ_w 增大, 使得热场致发射电流密度相对降低, 故而使阴极发射进入间隙区的电子的空间电荷效应受到“削弱”的缘故. 从图 2(b) 中还可以看出, 当外加电场 $E = 3 \times 10^9$ V/m 时, 在温度 T 为 300—2500 K

范围内, E_{st} 和外加电场几乎相等, 说明在此 E 条件下, 阴极的热场致发射电流密度较小, 空间电荷效应十分微弱; 而在 E 较高如 $E = 9 \times 10^9$ V/m 时, 阴极表面的稳态电场 E_{st} 则受空间电荷效应的显著影响, 在 $T = 300$ K 时, E_{st} 约为外加电场的 72%, 在温度为 4000 K 时, E_{st} 仅约为外加电场的 50%.

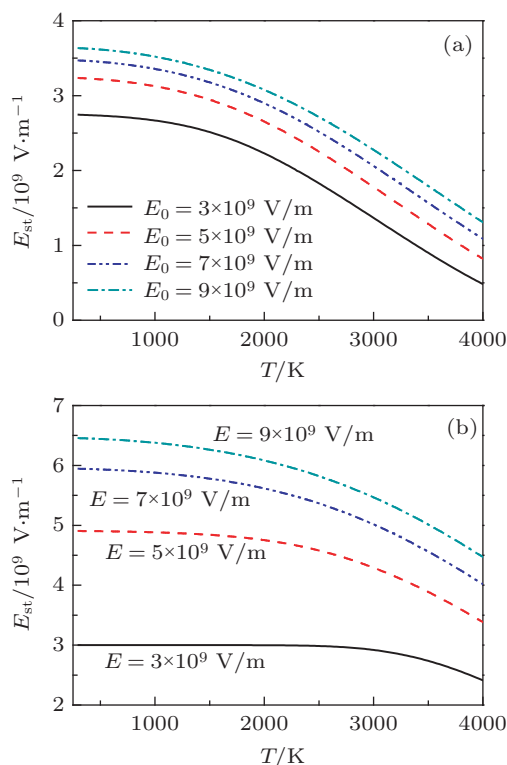


图 2 阴极表面稳态电场与温度的关系 (a) $\phi_w = 3.0$ eV; (b) $\phi_w = 4.52$ eV

图 3 是在考虑热场致发射电子的空间电荷效应后, 用阴极表面稳态电场 E_{st} 计算所对应的外加电场条件下的诺廷汉效应随温度的变化, 用 $\epsilon_{sc,n}$ 表示考虑在空间电荷效应的影响后, 热场致发射出电子从阴极带走的平均能量. 图 3 显示, 考虑空间电荷效应后, 诺廷汉效应中的冷却效应更加显著, 在 $\phi_w = 3.0$ eV 时, E 从 3×10^9 V/m 增大到 9×10^9 V/m 过程中, 诺廷汉效应的转换温度 T_{inv} 略有增加, 但变化幅度不大, 而在 $\phi_w = 4.52$ eV 时, 不同外加电场下的 T_{inv} 的差异较大. 图 1 中在外加电场较小时, 诺廷汉效应随温度的变化较为平缓, 但图 4 中考虑空间电荷效应对诺廷汉效应影响后, 可看出, 即使 $E = 3 \times 10^9$ V/m 情形下, 诺廷汉效应随温度的变化也较为剧烈, 在 $\phi_w = 3.0$ eV 时, 计算得到的 $\epsilon_{sc,n}$ 为 -0.10 — 2.82 eV, 而 $\phi_w = 4.52$ eV 时, 这一范围为 -0.09 — 3.15 eV, 变化范围相较于图

1 中不考虑空间电荷效应时的 ϵ_n 的范围 (分别为 $[-0.11, 1.38]$ eV 和 $[-0.09, 2.87]$ eV) 大.

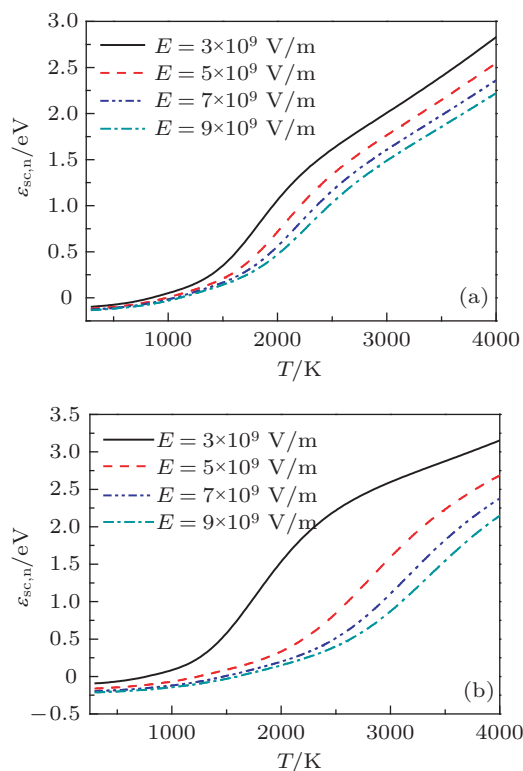


图 3 考虑空间电荷效应后诺廷汉效应与温度的关系 (a) $\phi_w = 3.0$ eV; (b) $\phi_w = 4.52$ eV

图 4 中给出了考虑空间电荷效应与不考虑空间电荷效应两种情形下诺廷汉效应所得结果的相对偏差. 图 4 的结果显示, 当 ϕ_w 在 3.0 — 4.52 eV 之间、外加电场 E 在 3×10^9 V/m 到 9×10^9 V/m 范围内时, 考虑空间电荷效应的影响后, 热场致发射电子所带走的平均能量更高, 相对于不考虑空间电荷效应时要大 0 — 2.5 eV, 即诺廷汉效应对阴极表面的冷却效应更强.

由图 4 的结果还可以看出, 差异值 $\epsilon_{sc,n} - \epsilon_n$ 随外加电场的增强而增大, 也随着阴极表面温度的变大而变大. 在温度较低时, 计算中是否考虑空间电荷效应, 对诺廷汉效应的所得结果影响较小, 因此低温情形下, 可忽略空间电荷效应对诺廷汉效应计算所产生的影响, 但阴极表面温度高到一定程度时, 则必须考虑空间电荷效应对诺廷汉效应的影响. 例如, 当我们以偏差为 0.5 eV 为界、考虑外加电场为 9×10^9 V/m 的情形, 对照图 4 可看出: 当 $\phi_w = 3.0$ eV 时, 若阴极表面温度超过 1400 K, 则必须考虑空间电荷效应的影响; 当 $\phi_w = 4.52$ eV 时, 则在温度超过约 2700 K 时, 必须考虑空间电荷效

应的影响.

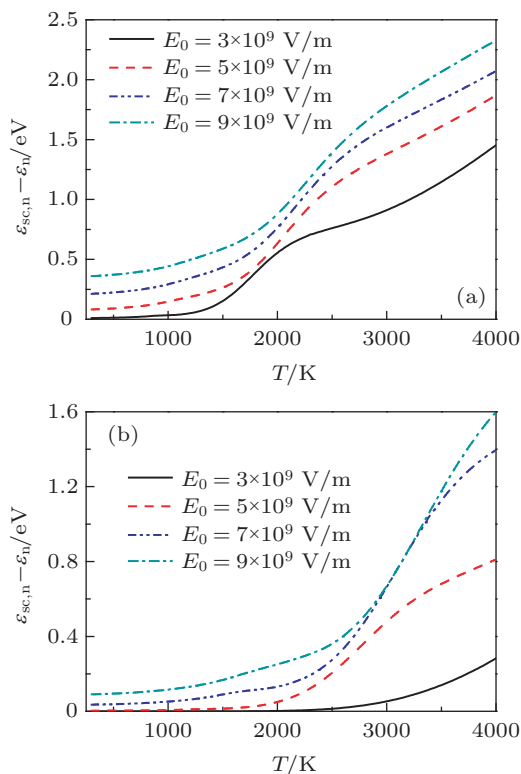


图4 考虑空间电荷效应影响后诺廷汉效应计算结果的偏差 (a) $\phi_w = 3.0$ eV; (b) $\phi_w = 4.52$ eV

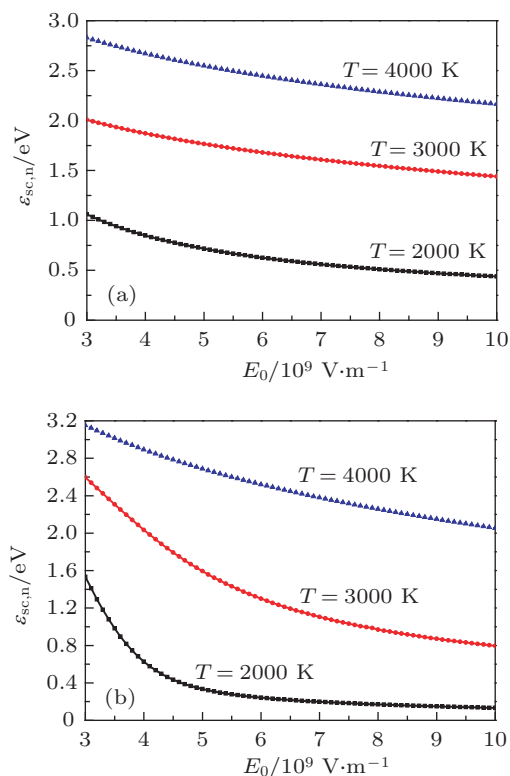


图5 考虑空间电荷效应的影响后诺廷汉效应随外加电场的变化 (a) $\phi_w = 3.0$ eV; (b) $\phi_w = 4.52$ eV

图5是 ϕ_w 分别为3.0和4.52 eV时,在考虑了热场致发射空间电荷效应后,计算得到的诺廷汉效应结果 $\varepsilon_{sc,n}$ 随外加电场的变化情况.由图5(a)和(b)可看出,阴极表面温度确定的情况下,考虑空间电荷效应的影响后,热场致发射电子从阴极带走的平均能量随外加电场的增加呈非线性下降规律;温度在2000 K以上时, $\varepsilon_{sc,n}$ 均大于0,即诺廷汉效应表现为冷却效应.从图5(b)来看, ϕ_w 较大时,若温度为2000 K,则 $\varepsilon_{sc,n}$ 随外加电场的增大先迅速下降,随后下降趋于平缓,这主要是由于逸出功较大时,外加电场需要达到一定的强度,阴极才会产生较高的热场致发射电流密度.

4.3 诺廷汉效应受空间电荷效应影响的物理机理

为研究空间电荷效应对诺廷汉效应产生影响的物理机制,下面从两种效应的基本物理概念及两者间的联系出发,探究二者间的影响机理.诺廷汉效应是固体电子发射过程中所产生的一种物理现象,涉及到固体发射电子理论,属于量子力学在凝聚态物理上的典型应用,它是指当发射出电子的能量处于费米能级以下时,由于阴极固体中替代该发射电子的能量与费米能级相等,因而会造成阴极表面出现升温效应;反之当发射出电子的能量处于费米能级以上时,电子将带走一部分能量使得阴极表面温度降低.而空间电荷效应则是由于热场致发射产生的电子进入二极管间隙区后,电子电荷密度产生的空间电荷场对阴极表面电场产生“屏蔽削弱”作用所致,发射出的电子在宏观电场中的运动属于经典物理学范畴.

(12)式描述了电子能量处于 $(\varepsilon, \varepsilon + d\varepsilon)$ 范围内的电子数目,为自由电子的能量分布函数^[21],将其绘制成图6所示的分布曲线,可直观地看到阴极表面温度对分布函数的影响,尤其是对能量处于费米能级 ε_F 附近的电子分布的影响,图6中的常数

$$C = [4\pi(2m_e)^{3/2}]/h^3.$$

$$\frac{dN(\varepsilon, T)}{d\varepsilon} = \frac{4\pi(2m_e)^{3/2}}{h^3} \frac{\varepsilon^{1/2}}{1 + \exp[(\varepsilon - \varepsilon_F)/kT]}. \quad (12)$$

由图6可看出,不论在什么温度下,低能量部分电子分布基本不变,只在费米能级 ε_F 附近小范围内,电子分布受到温度影响较大;且阴极表面的

温度越高, 在费米能级附近低于 ε_F 的能级空着的愈多, 而高于 ε_F 被占据的能级愈多. 因此当阴极表面温度愈高时, 热场致发射出来的电子中, 能量在费米能级附近或高于费米能级的电子所占的份额就越多, 这就解释了为什么温度越高, 诺廷汉效应中的冷却效应越强这一物理现象. 阴极表面温度是一个可观测的宏观物理量, 会受诺廷汉效应的影响(加热或冷却效应), 反过来, 阴极表面温度的改变亦会对诺廷汉效应产生影响.

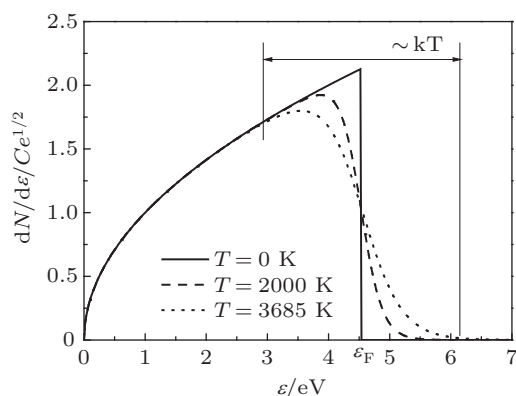


图6 阴极固体内部电子按能量的费米-狄拉克分布

此外, 由前面的模拟计算可知, 考虑空间电荷效应后, 阴极表面外加电场的变化也会对诺廷汉效应产生影响, 下面分析诺廷汉效应受空间电荷效应影响的物理机理. 阴极表面的强电场会使得阴极固体表面的势垒高度降低、宽度变窄. 考虑到发射出的自由电子受镜像力作用, 电子受到阴极表面势垒的阻碍, 在外电场的作用下的势垒形状可用 $\varepsilon(x) = \varphi_w - e^2/(16\pi\epsilon_0 x) - eEx$ 来描述.

通过 $d\varepsilon(x)/dx = 0$ 可得到势垒的最高点所在处距阴极金属表面的位置 $x_{\max} = (e/(16\pi\epsilon_0 E))^{1/2}$, 由此可得出势垒受到外加电场影响后的改变量 $\Delta\varphi = (e^3 E/(4\pi\epsilon_0))^{1/2}$. 外加电场为 3×10^9 , 5×10^9 , 7×10^9 和 9×10^9 V/m 时, 所对应的 $\Delta\varphi$ 分别为 2.08, 2.68, 3.17 和 3.60 eV, $\Delta\varphi$ 也称为肖特基势垒 (Schottky barrier)^[22]. 图 7 是不同强度的外加电场条件下, 阴极表面的势垒形状, 外加电场强度越高, 势垒高度越低, 宽度越窄. 因此, 当阴极表面电场愈高时, 由于势垒越低且越窄, 电子愈容易从阴极逸出, 导致热场致发射出的电子中, 能量在费米能级附近或高于费米能级的电子所占的份额就越多, 所以冷却效应就越弱, 这就解释了外加电场越强, 诺廷汉效应中冷却效应越弱的规律. 另外, 图 5 所示的结

果是考虑空间电荷效应后诺廷汉效应随外加电场变化的关系. 在同一个温度条件下, 由图 2 可知, 外加电场越强时所对应的阴极表面稳态电场越强, 因此诺廷汉效应中的冷却效应越弱, 即热场致发射的电子从阴极带走的平均能量随外加电场的增加而下降.

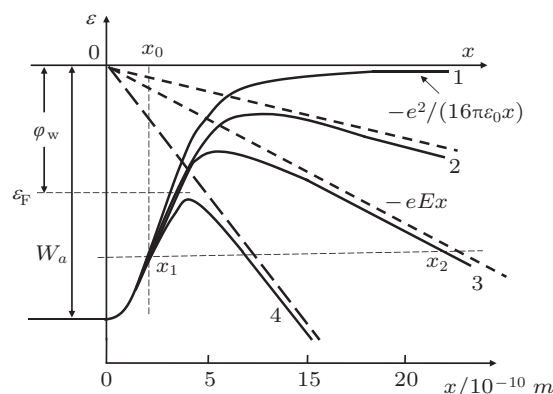


图7 阴极表面势垒受外电场的影响 1 无外电场; 2 外电场较弱; 3 外电场较强; 4 外电场最强

4.4 二极管间隙距离对诺廷汉效应的影响

空间电荷效应还受到二极管间隙距离的影响. 下面讨论考虑空间电荷效应后, 二极管间隙距离对诺廷汉效应的影响规律. 根据前文建立的物理计算模型, 选择 $\Delta\varphi$ 为 4.52 eV, 二极管间隙距离 d 为 0.01—5 mm, 先计算出不同的阴极表面温度条件下, 阴极表面的稳态电场 E_{st} 与 d 的关系如图 8 所示. 由图 8 中可看出, 在阴极表面温度固定时, 阴极表面稳态电场 E_{st} 随 d 的增大而下降, 且间隙距离越短, 下降速率越快; 温度越高, 由于热场致发射的电流密度越大, 故而空间电荷效应对阴极表面电场的“屏蔽削弱”作用越强, 阴极表面稳态电场越低, 这一现象和图 5 显示的规律一致.

图 9 是考虑空间电荷效应后, 计算得到的诺廷汉效应随二极管间隙距离的变化. 由图 9 可看出, 在 d 较短时, 反映诺廷汉效应强弱的 $\varepsilon_{sc,n}$ 随二极管间隙距离 d 的增大而快速增大, 即冷却效应随二极管间隙距离的增大而变强. 这主要是因为二极管间隙距离越大时, 阴极表面稳态电场强度越低, 使得阴极表面势垒在外加电场作用下被降低和变窄的程度也越小, 热场致发射出的电子, 其能量在费米能级附近或高于费米能级的电子所占的份额就越多, 因而对阴极表面的冷却效应就越强. 再对比图 9(a) 中温度为 4000 和 1000 K 的两条曲线, 可看到

温度为 1000 K 时, $\varepsilon_{\text{sc},n}$ 随间隙距离 d 的变化很小, 这是由于温度较低时, 热场致发射电流密度较低,

空间电荷效应不明显, 由图 8(a) 中也能看出, 温度为 1000 K 时, E_{st} 随二极管间隙距离 d 的变化很小.

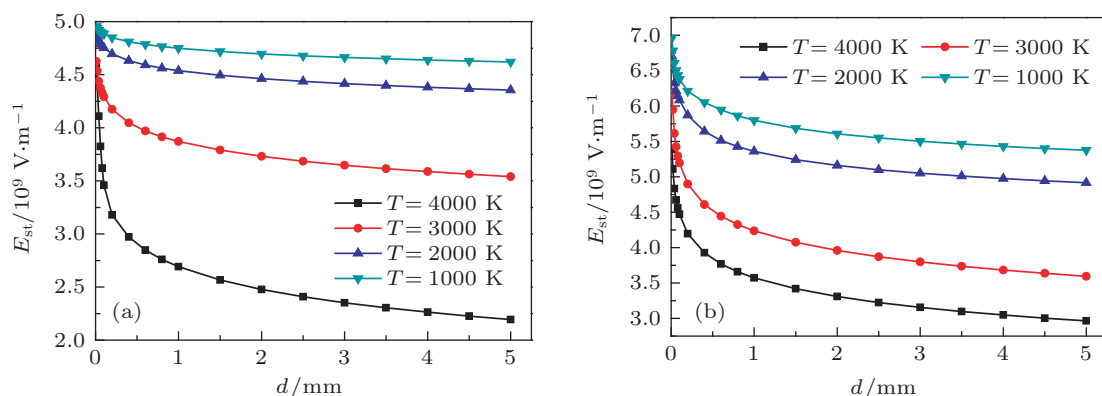


图 8 阴极表面稳态电场与二极管间隙距离的关系 (a) 5×10^9 V/m; (b) 9×10^9 V/m

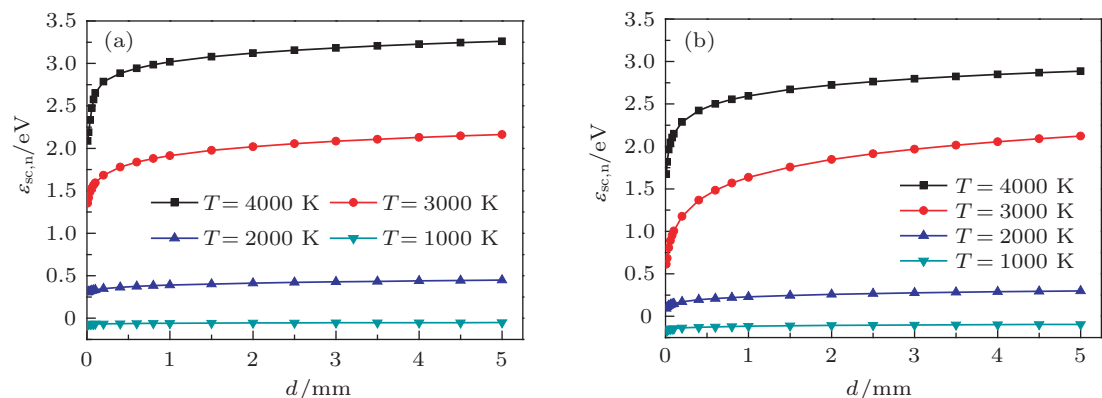


图 9 考虑空间电荷效应的影响后诺廷汉效应随二极管间距的变化 (a) 5×10^9 V/m; (b) 9×10^9 V/m

5 结 论

本文通过理论分析与数值计算相结合的方法, 对热场致发射过程中的诺廷汉效应受到空间电荷效应的影响规律和物理机理进行了研究. 结果表明: 大多数情况下, 诺廷汉效应中的冷却效应占据主导地位; 考虑空间电荷效应后, 在同一个外加电场条件下, 阴极表面稳态电场随温度的升高而下降, 且温度越高, 阴极表面稳态电场受空间电荷效应的影响程度越深; 考虑热场致发射电子的空间电荷效应的影响后, 诺廷汉效应的冷却效果更加显著, 电子带走的平均能量比不考虑空间电荷效应影响时要

多 0—2.5 eV.

本文的研究揭示了诺廷汉效应受空间电荷效应影响的物理机理. 阴极表面温度越高, 热场致发射出电子的能量在费米能级附近或高于费米能级的电子所占的份额就越多, 因此空间电荷效应对诺廷汉效应的影响也越大; 外加电场强度越大时, 热场致发射达到稳定后, 阴极表面的稳态电场强度越大, 因此考虑空间电荷效应后, 对诺廷汉效应的计算结果与不考虑空间电荷效应时计算所得结果之间的差异随外加电场强度变大而变大; 二极管间隙距离也会对空间电荷效应产生影响, 阴极表面温度固定时, 诺廷汉效应的冷却效应随二极管间距的增大而增强.

- [1] Jensen K L, Cahay M 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 154105
- [2] Liu X S 2007 *Intense Particle Beams and Its Applications* (Beijing: National Defense Industry Press) p139 (in Chinese) [刘锡三 2007 强流粒子束及其应用 (北京: 国防工业出版社) 第 139 页]
- [3] Peng K, Liu D G 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 121301 (in Chinese) [彭凯, 刘大刚 2012 物理学报 **61** 121301]
- [4] Miller R B (translated by Liu X S, Zhang L Z, Wu Y B, Lu J P, Zhou P Z) 1982 *An Introduction to the Physics of Entense Charged Particle Beams* (New York: Plenum Press) p39 [Miller R B 著 (刘锡三, 张兰芝, 吴衍斌, 鲁敬平, 周丕璋译) 1990 强流带电粒子束物理学导论 (北京: 原子能出版社) 第 39 页]
- [5] Charbonnier F M, Strayer R W, Swanson L W, Martin E E 1964 *Phys. Rev. Lett.* **13** 397
- [6] Bergeret H 1985 *Phys. Rev. B* **31** 149
- [7] Paulini J, Kiein T, Simon G 1993 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **26** 1310
- [8] Rossetti P, Paganucci F, Andreucci M 2002 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30** 1561
- [9] Zuo Y H, Wang J G, Fan R Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 215202 (in Chinese) [左应红, 王建国, 范如玉 2012 物理学报 **61** 215202]
- [10] Lü J Q 2010 *Chin. Phys. B* **19** 032901
- [11] Zuo Y H, Wang J G, Zhu J H, Niu S L, Fan R Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 177901 (in Chinese) [左应红, 王建国, 朱金辉, 牛胜利, 范如玉 2012 物理学报 **61** 177901]
- [12] Jensen K L, Lebowitz J, Lau Y Y, Luginsland J 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 054917
- [13] Murphy E L, Good R H 1956 *Phys. Rev.* **102** 1464
- [14] Coulombe S, Meunier J L 1997 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **30** 776
- [15] He X, Scharer J, Booske J, Sengele S 2008 *J. Vac. Sci. Technol. B* **26** 770
- [16] Petrin A B 2009 *J. Exp. Theor. Phys.* **109** 314
- [17] Miller S C, Good R H 1953 *Phys. Rev.* **91** 174
- [18] Liu G Z, Yang Z F 2010 *Chin. Phys. B* **19** 075207
- [19] Sun S, Ang L K 2012 *Phys. Plasmas* **19** 033107
- [20] Brattain W H, Becker J A 1933 *Phys. Rev.* **43** 428
- [21] Anders A 2008 *Cathodic Arcs: from Fractal Spots to Energetic Condensation* (New York: Springer Science) p80
- [22] Ru G P, Yu R, Jiang Y L, Ruan G 2010 *Chin. Phys. B* **19** 097304

Influence of space charge effect on Nottingham effect in thermal field emission*

Zuo Ying-Hong^{1)2)†} Wang Jian-Guo¹⁾ Fan Ru-Yu¹⁾²⁾

1) (Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

2) (Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 3 September 2013; revised manuscript received 23 September 2013)

Abstract

High current electron beam emitting from a thermal field emission cathode has an intense space charge effect. In order to investigate the mechanism for the influence of space charge effect on Nottingham effect in thermal field emission, the results of Nottingham effect with and without space charge effect at different work functions and various applied electric fields are obtained numerically on the basis of the theoretical analyses of space charge effect and Nottingham effect. The results demonstrate that the space charge effect has a significant influence on the steady electric field at the cathode surface, and thus the effect of space charge on Nottingham effect is not ignorable. When the work function is in a range of 3.0–4.52 eV and the applied electric field is in a scope of 3×10^9 – 9×10^9 V/m, the average energy delivered per electron in thermal field emission is in a span of 0–2.5 eV larger than that in the case without space charge effect, and the higher the cathode temperature or applied electric field, the larger the difference between them is. The average energy delivered by per electron emitting from cathode is observed to nonlinearly decrease with the increasing of applied electric field when the space charge effect is included. When the cathode temperature is high, the cooling effect in Nottingham effect can be intensified as the gap distance of diode increases.

Keywords: thermal field emission, Nottingham effect, space charge effect, electric field at the cathode surface

PACS: 79.70.+q, 52.59.Sa, 85.30.Fg

DOI: 10.7498/aps.62.247901

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61231003).

† Corresponding author. E-mail: zuoyinghong@tsinghua.org.cn