

DOI: 10.7652/xjtuxb201510016

金属二次电子发射能谱的表面吸附势垒模型

虞阳烨, 曹猛, 张海波

(西安交通大学电子物理与器件教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了改善加速器和高功率微波源中金属器壁的表面状况,采用数学建模并结合实验验证的方法,建立了二次电子能谱的吸附势垒模型。首先,以到达金属内表面二次电子为参考对象,分析金属壁的吸附过程,发现水蒸气吸附造成的能级扭曲会使金属表面势垒降低,由此建立了水吸附形态下的薛定谔方程,并求解得到吸附势垒的透射系数;然后,结合内二次电子能量分布建立吸附势垒模型,得到二次电子能谱特征参数与吸附量的定量关系。模型分析结果表明:吸附量的增加会引起表面势垒的降低,从而导致金属器壁二次电子发射增强,能谱变窄,加剧电子云效应;通过加热、氩离子清洗等手段可减少或去除加速器壁水蒸气吸附,抑制器壁表面二次电子发射。实验对比发现,离子清洗可减少吸附量,使 Ag 样品的吸附度从初始值 0.5 降至 0,伴随能谱半峰宽从 5.17 eV 展宽至 12.5 eV。

关键词: 二次电子发射;二次电子能谱;吸附;表面势垒;透射系数

中图分类号: TN16;O462 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)10-0097-06

A Model of Surface Adsorption Barrier on Secondary Electron Spectrum of Metal

YU Yangye, CAO Meng, ZHANG Haibo

(Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A model of surface adsorption barrier on secondary electron (SE) spectrum is proposed to improve the surface state in accelerators and high power microwave sources. Mathematical modeling and experimental verification are used in building the model. Inner SEs are chosen as the initial condition of the SE emission. It is found through analysis that the adsorption of water vapor distorts the energy level and reduces the surface barrier. Then, Schrodinger equation for water adsorption is established to get the transmission coefficients. The adsorption barrier model is built and quantitative relationships between SE spectrum characteristic parameters and adsorption amount are obtained by considering the inner SE energy distribution. Analytical results from the model show that increasing the amount of adsorption reduces the surface barrier, and results in enhanced SE emission from metal wall, narrowed spectrum and aggravated electron cloud effect. It is also found that the water adsorption on accelerator wall can be reduced or eliminated, and the SE emission can be suppressed by heating and ion cleaning. Experiments show that ion cleaning reduces the amount of adsorption, and the adsorption of Ag samples reduces from its initial value 0.5 to 0, while the spectrum width at half maximum increases from

5.17 to 12.5 eV.

Keywords: secondary electron emission; secondary electron spectrum; adsorption; surface barrier; transmission coefficient

材料的二次电子发射在应用物理的各个领域一直受到广泛的关注。例如,在各类粒子加速器和高功率微波器件中,二次电子倍增是影响器件稳定性的重要原因^[1-5],而在扫描电子显微镜(SEM)成像中,二次电子发射对成像的对比度和分辨率有着重要影响^[6-9]。材料表面的吸附状态是影响其二次电子发射特性的一个非常重要的因素。已有的实验研究表明,氩离子清洗能改变金属和介质表面吸附状态^[10-11],而热处理也可使金属材料表面解吸附^[12-13],相应的二次电子发射特性会发生改变。然而,对于吸附影响二次电子发射特性的内在机理,则仍缺乏理论上的深入解释。

材料表面的势垒是联系表面吸附和二次电子发射特性的关键因素。表面吸附会影响材料表面势垒,而二次电子出射时需要越过表面势垒,必然受到表面势垒的影响。因此,表面吸附影响二次电子发射的机理分析需要研究2个方面的影响:一是表面吸附对表面势垒的影响;二是表面势垒对二次电子出射的影响。以往的研究工作往往只侧重讨论其中的一种因素,而缺乏两者的有机统一。此外,以往的工作通常采用功函数这一参数来表述表面势垒的高低,而忽略表面势垒的具体形态,这样的处理方法很难得到精确的结果。

本文旨在以表面势垒为媒介研究表面吸附影响二次电子发射能谱的微观机理。首先建立了一定表面吸附下的表面势垒分布的模型,然后在此模型的基础上分析了表面势垒对二次电子发射能谱的影响,最后结合实验研究对所建立的模型进行了验证。本文的研究工作将有助于深入了解表面吸附与二次电子发射能谱的微观机制,为调控二次电子发射特性提供理论指导。

1 吸附势垒模型

电子跨越表面势垒是二次电子发射中的一个重要阶段。入射电子束照射样品会与金属原子发生散射并激发出内二次电子。内二次电子向表面运动并发生级联散射,到达金属表面的内二次电子需要克服表面势垒才能最终形成二次电子发射。本文选取即将跨越表面势垒的内二次电子为初始研究对象,假设这些内电子能谱分布为 $N_0(E_{in})$,其中 E_{in} 为内

二次电子的能量。对于能量为 E_{in} 和出射角度为 α 的内二次电子,通过求解一定势垒下的薛定谔方程得到其穿透表面势垒的透射系数 $T(E_{in}, \alpha)$ 。将透射系数 T 对角度 α 积分得到一定能量的内二次电子的透射系数。内二次电子的能谱与对应能量的透射系数相乘即可得到出射二次电子能谱

$$N(E) = CN_0(E+U) \int T(E+U, \alpha) d\alpha \quad (1)$$

式中: U 是电子跨越表面引起的能量损失; C 是归一化常数。

1.1 内二次电子能谱分布

内二次电子能谱分布是本文模型的初始条件。Streitwolf 和 Baroody 等人从散射的物理过程出发推导出内二次电子能谱如下^[14]

$$N_0(E_{in}) \propto \frac{1}{(E_{in} - E_F)^\gamma} \quad (2)$$

式中: E_F 是样品材料的费米能级。

Chung 和 Everhart 在分析二次电子的能谱公式时将 γ 值取为 2^[14],但该取值在高能段($E_{in} > 20$ eV)不够准确。材料的表面势垒一般只有几 eV,因此高能段的电子的透射系数 T 非常接近于 1。根据式(1),出射二次电子在高能段的能谱形状应该非常接近于 $N_0(E_{in})$ 。因此,本文根据二次电子能谱实验结果对 γ 取值进行一定的优化。图1给出了入射电子能量为 300 eV 时,纯银样品发射的二次电子在 20~60 eV 范围内的能谱分布,使用了双对数坐标,且电子数已进行了归一化处理。实验结果由 DESA 150 能谱仪测得。测试前使用能量为 1 keV 的氩离子对样品进行了 10 min 清洗,以使表面最接近清洁状态,更多实验细节见文献[10]。根据式(2),取双

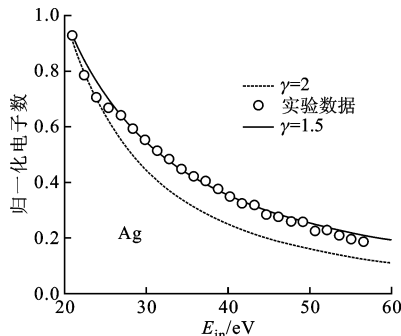


图1 γ 取值的实验结果

对数坐标时, $\lg N_0(E_{in}) = A - \gamma \lg(E_{in} - E_F)$, 其中 A 为常数, 若以 E_F 为参考能级, $N_0(E_{in})$ 与 E_{in} 应呈直线关系, 其斜率即为 $-\gamma$ 。根据实验结果, 本文对 γ 进行优化, 取值为 1.5。

1.2 表面势垒模型

金属表面的气体吸附是改变表面势垒的重要因素, 本节建立一定吸附下的表面势垒模型。图 2 为材料表面势垒示意图。对于没有吸附的理想表面, 其势垒为矩形阶跃函数, 如图中虚线所示。实际情况中, 由于表面吸附的存在, 金属和真空之间会存在一个过渡的吸附层。吸附层内原子分布不同于体相, 有许多悬空键化学价, 从而产生复杂的表面态。吸附与表面势垒的关系一般来说非常复杂, 为简单起见, 本文仅考虑物理吸附。一般常见的吸附物的亲和势 χ 都小于金属的功函数 ϕ , 吸附会使得表面势垒向下弯曲, 在吸附层内, 离金属表面越远, 吸附密度越低, 对应的势垒下降速度越慢。图中, U_0 和 U_v 分别为势垒的初始高度和最终高度, a 为吸附层厚度。

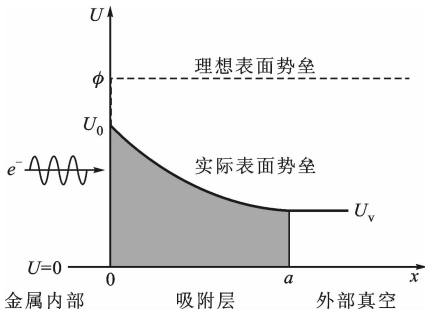


图 2 内表面二次电子跨越势垒示意图

引入吸附度 $\eta = Q/Q_{\max}$ 来衡量吸附量的大小, 其中 Q 为吸附量, $Q_{\max}$ 为最大吸附量。表面势垒高度随着吸附量 Q 的增大而降低, 因此随着 η 增大, 表面势垒也相应降低。经典理论^[15]认为, 单晶金属表面吸附覆盖量与逸出功之间存在简单线性关系, 若不考虑吸附厚度, 金属与吸附层界面处势垒高度 U_0 与吸附度 η 成线性关系

$$U_0 = \phi - \eta(\phi - \chi), \quad 0 \leq \eta \leq 1 \quad (3)$$

显然, $\eta=1$ 时, $U_0=\chi$, 对应为吸附层内紧密排列着吸附原子, 此时二次电子只需克服吸附物的亲和势 χ 即可出射; $\eta=0$ 时, 表面无吸附, 电子需克服金属功函数 ϕ 才能出射。

在吸附层内部, 势垒高度越接近外层变化越平缓, 在势垒外侧 $x=a$ 处导数为 0。本模型认为, 势垒的最终高度 U_v 也受吸附度 η 的影响, 有以下关系

$$U_v = U_0 - \eta(U_0 - \chi) \quad (4)$$

假设下降形态满足二次函数, 推导得到势垒形状满足下式

$$U(x) = \frac{(U_0 - U_v)}{a^2}(x - a)^2 + U_v \quad (5)$$

1.3 内二次电子透射系数

内表面二次电子跨越势垒的透射系数是影响二次电子发射的另一个重要因素。金属内部运动到吸附层内表面的二次电子需要克服表面势垒才能出射到真空, 因此在计算电子的透射系数时, 不仅需要考虑电子的能量 E_{in} 、角度 α ^[16-18], 还需要考虑势垒的形状。对于特定的表面势垒分布 $U(x)$, 通过求解薛定谔方程来得到金属内部和势垒外部的电子态密度, 并根据势垒两侧电子态密度之比得到透射系数 $T(E_{in}, \alpha)$ 。由于样品尺寸远大于表面吸附层的厚度, 可以使用一维模型来进行处理。对于一定的势垒分布 $U(x)$, 电子波函数 ψ 满足薛定谔方程

$$\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} + (E_{in} \cos^2 \alpha - U(x)) \psi(x) = 0 \quad (6)$$

式中: m 是电子质量; $\hbar$ 是约化的普朗克常量; $E_{in} \cos^2 \alpha$ 代表了二次电子能量的垂直分量。模型只需考虑二次电子能量的垂直分量, 因为平行方向电子的运动并不影响其透射。

在金属内部和表面势垒以外的真空区域, $U(x)$ 分别为常数, 方程(6)对应的解为均匀平面波, 则金属和真空区域的电子波函数分别为

$$\left. \begin{aligned} \psi_m(x) &= A_m \exp(jk_m x) + B_m \exp(-jk_m x) \\ \psi_v(x) &= A_v \exp(jk_v x) + B_v \exp(-jk_v x) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: 下标 m 和 v 对应代表金属和真空区域; 电子在 2 个区域的波数 $k_m = (2mE_{in} \cos^2 \alpha)^{1/2} / \hbar$; $k_v = (2m(E_{in} \cos^2 \alpha - U_v))^{1/2} / \hbar$; 系数 A 和 B 分别为入射波和反射波的振幅。

吸附层内势垒分布 $U(x)$ 是位置 x 的函数, 此时一般很难得到波函数的解析解。为此, 将势垒沿厚度方向分成 n 层, 如果每一层的厚度足够小, 其势垒可视为常数 $U_i, 1 \leq i \leq n$ 。此时, 在每一层内, 波函数有如下形式的通解

$$\left. \begin{aligned} \psi_i(x) &= A_i \exp(jk_i x) + B_i \exp(-jk_i x) \\ k_i &= (2m(E_{in} \cos^2 \alpha - U_i))^{1/2} / \hbar \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: ψ_i 和 k_i 分别表示第 i 层内的波函数和波数。此外, 还可以将金属内部记为第 0 层而将真空记为第 $n+1$ 层。

波函数在层间的界面上满足连续性边界条件

$$\left. \begin{aligned} \psi_i(x_i) &= \psi_{i+1}(x_i) \\ \frac{\partial \psi_i}{\partial x} \Big|_{x=x_i} &= \frac{\partial \psi_{i+1}}{\partial x} \Big|_{x=x_i} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: x_i 为第 i 层与第 $i+1$ 层分界面的位置。

同时,二次电子进入自由真空区域后不会再返回金属,即在真空区域没有反射波,有 $B_{n+1}=0$ 。求解式(9)可以得到 A_0 与 A_{n+1} 的关系。由于波函数幅值的平方表示电子态密度,因此透射系数 T 为

$$T = \frac{k_{n+1} |A_{n+1}|^2}{k_0 |A_0|^2} \quad (10)$$

将式(10)代入式(1)即可得到出射二次电子的能谱。

2 结果与讨论

2.1 表面吸附量对二次电子能谱的影响

按照上述模型,本文分析了不同吸附量对能谱的影响。本文以金属银为研究对象,其功函数 ϕ 取其典型值 4.63 eV。根据本课题组已有的研究结果^[12],金属银样品经长时间暴露在空气中后表面会吸附大量的气体,残余气体分析(RGA)结果显示吸附物的主要成分是水蒸气。因此,吸附物的亲和势取值水的亲和势 0.75 eV。

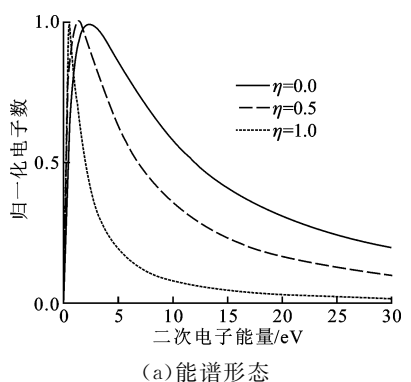
图3给出了吸附度 η 对二次电子能谱的影响规律。从图3a可以看出,当吸附量逐渐增多,即 η 从0增大至1的过程中,能谱半峰宽变窄,电子数最大值所对应的能量,最可几能量减小,这是因为随着吸附量的增加,表面势垒高度迅速降低,而由 $N_0(E_m)$ 可

知,内二次电子的能量越低则数量越多,表面势垒降低后,更多低能电子可以出射,出射电子中低能量电子增多,从而导致能谱半峰宽和最可几能量迅速减小。图3b进一步给出了能谱半峰宽和最可几能量随吸附度 η 的变化规律,正如预期的,随着吸附度增大半峰宽变窄且最可几能量减小。同时,通过分析还发现两者与吸附度之间都具有非常好的线性关系,图3b中直线表示线性拟合的结果。

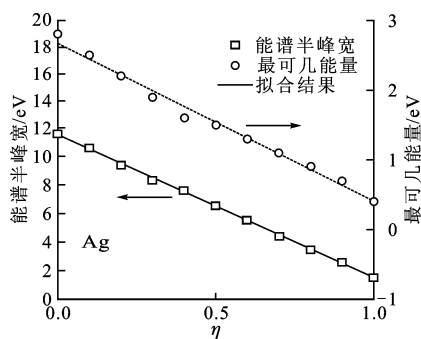
2.2 实验分析

采用上述模型可以对不同表面状态的二次电子能谱的实验结果进行分析。实验在一个超高真空(UHV)测试平台上进行,其主真空室真空度可达 9×10^{-9} Pa。实验样品为长、宽、厚分别为 1 cm、1.2 cm 和 0.25 mm 的银箔小块(CAS RN:7440-22-4,纯度(质量分数)为 99.998%)。样品经无水乙醇和去离子水清洗,并在空气中自然晾干。测试时可以通过原位的氩离子清洗和热处理来去除样品表面的吸附。二次电子能谱测试时入射电子能量为 300 eV,入射电子电流为 1 nA,束斑直径约 200 μm 。采用的能谱仪是垂直安装在样品台正上方的 DESA 150 分析仪,通过调整扫描电压可以调整能量分辨率。更多实验平台和样品处理的细节可参考文献[19-20]。考虑到样品均匀性的影响,每片样品选取3个不同测试点,结果取其平均值。

通过对样品进行热处理来改变其吸附量,测量不同热处理状态下的二次电子能谱。图4给出了Ag样品能谱的实验结果和计算结果的对比。由图4可见,暴露于大气的纯银原样能谱的最可几能量较低,为 1.4 eV,半峰宽较窄,为 5.17 eV,这一结果与 $\eta=0.5$ 的计算结果一致。对于暴露于大气的纯银原样,有一定的吸附物,但是由于气压和温度等原因,不可能达到最大吸附量。经过 400 $^{\circ}\text{C}$ 加热 2 h 后,最可几能量向右平移至 2 eV,能谱半峰宽展宽至 7.53 eV,此结果与 $\eta=0.35$ 时的计算结果相一致。加热后的能谱对应于较小的吸附度,这是由于加热使得表面吸附物出现部分脱附,而加热后吸附度并未减小到 0,表明样品表面还存在一定量的吸附,这些吸附具有较高的活化能,需要更高的加热温度或者更有效的清除手段才能去除。图中还给出了氩离子清洗后的样品的能谱的实验值,对应的最可几能量和半峰宽分别为 3.4 eV 和 12.5 eV,与 $\eta=0$ 时的计算结果很接近,表明离子清洗后的表面接近于理想清洁表面,但是最可几能量的实验值略大于计算值,可能因为离子清洗后表面存在正电荷的沉



(a) 能谱形态



(b) 能谱特征参数

图3 金属银表面吸度对二次电子能谱的影响

积^[21],导致真实势垒略高于理论值。总体上,模型计算的结果可以很好地解释实验现象。

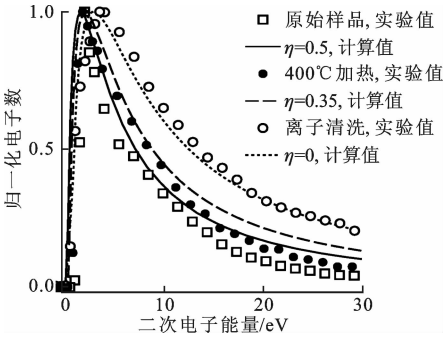


图 4 Ag 样品实验与计算能谱结果对比

2.3 表面势垒模型的讨论

本文通过表面势垒研究表面吸附对二次电子能谱的影响,根据不同吸附状态建立了表面势垒模型,分析吸附状态对二次电子能谱的影响:①对于暴露于大气的金属样品,表面存在大量的吸附物,这些吸附物使得表面势垒大幅度降低,二次电子发射大幅度增强;②加热会给表面吸附的气体分子提供动能,使得一部分气体分子特别是脱附能不高的物理吸附分子脱附,表面势垒有所升高,能谱展宽,最可几能量右移;③一部分吸附分子与表面形成了化学键,键能较大,加热不能有效去除;④氩离子具有很大的动能,会在表面溅射破坏表面化学键,清除绝大部分的吸附和污染,使材料表面接近理想状态。经氩离子清洗后的表面接近理想清洁表面的对应的二次电子能谱,半峰宽和最可几能量进一步增大。该模型还可以进行一定的扩展,本文认为主要吸附物为水蒸气,对于其他的吸附物,如 CO₂、CO、N₂ 等,可以通过调整吸附物的亲和势和边界条件等来进行分析。

当然,模型在有些方面还有待进一步改进。例如:模型认为势垒厚度是常数,而实际上应该与金属材料本身和吸附层的物理、化学性质等因素相关;模型忽略了电子在吸附层的散射,而这一影响在吸附层密度和厚度较大时可能会比较显著。实验方面,如果能够提供加热状态下原位测量功函数的结果,将更具有说服力,此外具体吸附量的测量也是尚待解决的问题。

3 结 论

本文通过表面势垒研究了金属表面吸附对二次电子能谱的影响,建立了表面势垒模型,将表面吸附状态的改变体现到表面势垒的变化上,再通过表面势垒的变化分析二次电子发射能谱的变化。模型计

算结果表明,表面吸附量的增加会降低表面势垒,从而使二次电子能谱变窄,最可几能量变小。另外,利用加热和离子清洗改变表面吸附状态,抑制二次电子发射。所得到的实验结果可以通过模型得到很好的解释。总之,本文对表面吸附、表面势垒和二次电子发射规律之间的关系进行了有机统一,建立了表面吸附势垒模型,给出了表面吸附影响二次电子发射能谱的内在机理。此外,在表面修饰抑制加速器壁二次电子发射等工作中,还可以利用本模型进行理论上的指导。

参考文献:

[1] CIMINO R, COLLINS I R. Vacuum chamber surface electronic properties influencing electron cloud phenomena [J]. Applied Surface Science, 2004, 235 (1/2): 231-235.

[2] KIRBY R E, KING F K. Secondary electron emission yields from PEP-II accelerator materials [J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section: A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 2001, 469(1): 1-12.

[3] RUMOLO G, ARDUINI G, METRAL E, et al. Dependence of the electron-cloud instability on the beam energy [J]. Physical Review Letters, 2008, 100(14): 144801.

[4] ZAMEROSKI N D, KUMAR P, WATTS C, et al. Secondary electron yield measurements from materials with application to collectors of high-power microwave devices [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2006, 34(3): 642-651.

[5] HOFF B W, MARDAHL P J, GILGENBACH R M, et al. Microwave window breakdown experiments and simulations on the UM/L-3 relativistic magnetron [J]. Review of Scientific Instruments, 2009, 80(9): 094702.

[6] SEILER H. Secondary electron emission in the scanning electron microscope [J]. Journal of Applied Physics, 1983, 54(11): R1-R18.

[7] REIMER L. Image formation in low voltage scanning electron microscopy [M]. Bellingham, WA, USA: SPIE, 1993: 1-12.

[8] CAZAUX J. Material contrast in SEM: Fermi energy and work function effects [J]. Ultramicroscopy, 2010, 110(3): 242-253.

[9] JOY D C, PRASAD M S, MEYER H M. Experimental secondary electron spectra under SEM conditions [J]. Journal of Microscopy, 2004, 215: 77-85.

[10] ZHANG H B, HU X C, WANG R, et al. Note:

- measuring effects of Ar-ion cleaning on the secondary electron yield of copper due to electron impact [J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(6): 066105.
- [11] 郝致远, 汲胜昌, 宋莹. 氩等离子体射流对聚四氟乙烯表面改性的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(4): 59-67.
- HAO Zhiyuan, JI Shengchang, SONG Ying. Experimental research on surface modification of polytetrafluoroethylene by Ar atmospheric pressure plasma jet [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(4): 59-67.
- [12] ZHANG H B, HU X C, CAO M, et al. The quantitative effect of thermal treatment on the secondary electron yield from air-exposed silver surface [J]. Vacuum, 2014, 102: 12-15.
- [13] BOJKO I, HILLERET N, SCHEUERLEIN C. Influence of air exposures and thermal treatments on the secondary electron yield of copper [J]. Journal of Vacuum Science and Technology: A, 2000, 18(3): 972-979.
- [14] CHUNG M S, EVERHART T E. Simple calculation of energy distribution of low-energy secondary electrons emitted from metals under electron-bombardment [J]. Journal of Applied Physics, 1974, 45(2): 707-709.
- [15] 胡汉泉, 王迁. 真空物理与技术及其在电子器件中的应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1982: 87-92.
- [16] CAZAUX J. Calculated influence of work function on SE escape probability and secondary electron emission yield [J]. Applied Surface Science, 2010, 257(3): 1002-1009.
- [17] CAZAUX J. Calculated effects of work function changes on the dispersion of secondary electron emission data: application for Al and Si and related elements [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(2): 024906.
- [18] DING Z J, LI H M, TANG X D, et al. Monte Carlo simulation of absolute secondary electron yield of Cu [J]. Applied Physics: A Materials Science & Processing, 2004, 78(4): 585-587.
- [19] 崔万照, 杨晶, 张娜. 空间金属材料的二次电子发射系数测量研究 [J]. 空间电子技术, 2013, 10(2): 75-78.
- CUI Wanzhao, YANG Jing, ZHANG Na. Testing method of the secondary electron emission yield of space metal materials [J]. Space Electronic Technology, 2013, 10(2): 75-78.
- [20] 杨晶, 崔万照, 胡天存, 等. 纯银材料的二次电子发射能谱研究 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(1): 141-144.
- YANG Jing, CUI Wanzhao, HU Tiancun, et al. Research of secondary electron energy spectrum on pure silver material [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014, 12(1): 141-144.
- [21] HU X C, ZHANG H B, CAO M, et al. Heating-induced variations of secondary electron emission from ion-cleaned copper samples [J]. Micron, 2014, 64: 52-56.
- [本刊相关文献链接]
- 田康, 刘卫华, 李昕, 等. 铜尖表面石墨烯原位生长工艺及其场发射特性. 2015, 49(8): 6-10. [doi:10.7652/xjtuxb201508002]
- 李昕, 张永, 殷德民, 等. 采用紧束缚格林函数法研究原子吸附石墨烯纳米带电子输运. 2015, 49(2): 37-42. [doi:10.7652/xjtuxb201502007]
- 李昕, 郭士西, 宋辉, 等. 石墨烯晶体管研究进展. 2014, 48(10): 1-8. [doi:10.7652/xjtuxb201410001]
- 李昕, 张娟, 李全福, 等. 面向集成电路的大尺寸单晶石墨烯的可控制备方法. 2014, 48(6): 103-109. [doi:10.7652/xjtuxb201406018]
- 刘婧, 张海波. 混合能量电子辐照聚酰亚胺的带电特性. 2014, 48(8): 1-6. [doi:10.7652/xjtuxb201408001]
- 杨俊, 蒋维涛, 王兰兰, 等. 曲面仿生复眼透镜微复型过程变形分析. 2013, 47(5): 121-125. [doi:10.7652/xjtuxb201305022]
- 王春媛, 张晔, 吴扬, 等. 融合共线方程和多项式修正的遥感影像正射校正. 2012, 46(12): 49-54. [doi:10.7652/xjtuxb201212009]
- 李尊朝, 罗诚, 王闯, 等. 部分耗尽异质环栅场效应晶体管阈值电压模型. 2013, 47(12): 50-54. [doi:10.7652/xjtuxb201312009]
- 刘林林, 李尊朝, 尤一龙, 等. 全耗尽围栅金属氧化物半导体场效应管二维模型. 2011, 45(2): 73-77. [doi:10.7652/xjtuxb201102015]
- 崔岩, 张吕权, 夏劲松, 等. 压电微悬臂梁探针的制作工艺研究. 2011, 45(1): 79-82. [doi:10.7652/xjtuxb201101016]
- 张稳稳, 吴朝新, 朱仁龙, 等. 有机电致发光器件稳定性测试系统的设计与实现. 2011, 45(2): 64-67. [doi:10.7652/xjtuxb201102013]
- 史永贵, 戴培赞, 杨建锋, 等. 物理气相传输(PVT)法生长碳化硅的晶体形态热应力分析. 2011, 45(1): 117-121. [doi:10.7652/xjtuxb201101023]

(编辑 刘杨)