

磁控溅射铂抑制镀银表面的二次电子发射

何鋈 俞斌 王琪 白春江 杨晶 胡天存 谢贵柏 崔万照

Suppressing secondary electron emission from silver-plated surface by magnetron sputtered platinum

He Yun Yu Bin Wang Qi Bai Chun-Jiang Yang Jing Hu Tian-Cun Xie Gui-Bai Cui Wan-Zhao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 087901 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172740

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172740>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[材料二次电子产额对腔体双边二次电子倍增的影响](#)

Influence of secondary electron yield of material on two-sided multipactor discharge in cavity

物理学报.2018, 67(3): 037901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.037901>

[铝阳极氧化的多孔结构抑制二次电子发射的研究](#)

Suppressing second electron yield based on porous anodic alumina

物理学报.2018, 67(3): 037902 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.037902>

[腔体双边二次电子倍增一阶与三阶模式瞬态特性对比](#)

Comparison between the 1st and 3rd order mode temporal characteristics of two-sided multipactor discharge in cavity

物理学报.2017, 66(20): 207901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.207901>

[多载波微放电阈值的粒子模拟及分析](#)

Particle simulation and analysis of threshold for multicarrier multipactor

物理学报.2017, 66(15): 157901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.157901>

[基于频域电磁场的微波器件微放电阈值快速粒子模拟](#)

Fast particle-in-cell simulation method of calculating the multipactor thresholds of microwave devices based on their frequency-domain EM field solutions

物理学报.2016, 65(23): 237901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.237901>

磁控溅射铂抑制镀银表面的二次电子发射*

何鋈¹⁾ 俞斌²⁾ 王琪¹⁾ 白春江¹⁾ 杨晶¹⁾ 胡天存¹⁾
谢贵柏¹⁾ 崔万照^{1)†}

1) (中国空间技术研究院西安分院, 空间微波技术重点实验室, 西安 710100)

2) (西安交通大学电子与信息工程学院, 西安 710049)

(2017年12月26日收到; 2018年2月7日收到修改稿)

降低表面的二次电子产额是抑制微波部件二次电子倍增效应和提升功率阈值的有效途径之一, 目前主要采用在表面构造陷阱结构和沉积非金属薄膜的方法降低二次电子产额, 其缺点是会改变部件的电性能. 针对此问题, 采用在表面沉积高功函数且化学惰性的金属薄膜来降低二次电子产额. 首先, 采用磁控溅射方法在铝合金镀银样片表面沉积 100 nm 铂, 测量结果显示沉积铂后样片的二次电子产额最大值由 2.40 降至 1.77, 降幅达 26%. 其次, 用相关唯象模型对二次电子发射特性测量数据进行了拟合, 获得了在 40—1500 eV 能量范围内能够准确描述样片二次电子产额特性的 Vaughan 模型参数, 以及在 0—50 eV 能量范围内能够很好地拟合二次电子能谱曲线的 Chung-Everhart 模型参数. 最后, 将获得的实验数据和相关拟合参数用于 Ku 频段阻抗变换器的二次电子倍增效应功率阈值仿真研究, 结果表明通过沉积铂可将部件的功率阈值由 7500 W 提升至 36000 W, 证实了所提方法的有效性. 研究结果为金属材料二次电子发射特性的研究提供实验数据参考, 对抑制大功率微波部件二次电子倍增效应应具有参考价值.

关键词: 二次电子产额, 二次电子倍增效应, 金属薄膜, 铂

PACS: 79.20.Hx, 73.43.Cd

DOI: 10.7498/aps.67.20172740

1 引言

二次电子发射现象自发现以来, 得到了非常广泛和深入的研究^[1-6], 其中作为表征二次电子发射能力强弱的指标, 材料的二次电子产额 (secondary electron yield, SEY) 备受关注^[7], 它是许多研究需要提前获取的一项关键物理参数. 由于所携带的信息丰富且空间分辨率很高, 扫描电子显微镜等表面微观分析设备正是借助于二次电子来对材料进行分析和表征的^[8,9]. 此外, 光电倍增管等一些基础元器件也是利用二次电子发射现象来对微弱光信号进行探测的^[10]. 虽然二次电子发射现象是一些先进材料表征和探测技术所依赖的, 但是在高能加速器装置、大功率微波源和空间大功率微波部件中却是需要抑制和避免的^[11-13]. 对于工作在空间

环境下的星载微波部件, 在大功率微波信号的作用下易发生二次电子倍增效应 (亦称为微放电效应), 导致器件永久失效和损坏^[13]. 二次电子倍增效应目前是威胁卫星有效载荷在轨稳定运行的一个潜在因素, 也是制约微波部件功率容量提升的一项瓶颈. 由于对星载微波部件的危害极大, 国际上开展了大量的研究来抑制二次电子倍增效应, 其中一个重要的方面就是降低微波部件表面的 SEY^[14-18].

目前公开报道的降低金属材料 SEY 的方法主要有两种, 一种是在金属材料表面构造诸如矩形沟槽、三角形沟槽和圆孔等陷阱结构来抑制二次电子发射^[14-16], 另一种是在金属表面沉积一些非金属材料薄膜 (比如石墨烯和 C)^[17,18]. 研究表明, 通过在银表面构造陷阱结构后可以显著地抑制二次电子发射, 降低表面的 SEY^[14]. 另外通过沉积石墨

* 国家自然科学基金 (批准号: U1537211, 11675278, 51675421) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: cuiwanzhao@126.com

烯和C薄膜,也可以降低铝、不锈钢和铜等金属材料表面的SEY^[17,18].这些研究为降低微波部件镀银表面的SEY提供了很好的借鉴和参考,然而不论是构造表面陷阱结构还是沉积非金属薄膜材料,都会对微波部件的电性能产生一定的影响,在某些对电性能要求比较严苛的情况下可能无法满足工程要求.要避免改变微波部件的电性能,最理想的方案是在不改变表面几何形貌的前提下沉积具有低SEY特性的金属材料,并且所沉积的金属材料应是化学惰性的,不与空气发生反应,从而保持二次电子发射特性的稳定.此外,Cazaux等^[19]的理论研究表明功函数越高,二次电子的逃逸概率越低,SEY也就越低.基于这些考虑,本文通过沉积具有高功函数的金属铂降低镀银表面的SEY,测量了沉积和未沉积铂的镀银样片二次电子发射特性,并用现有的SEY和二次电子能谱相关模型对测量数据进行拟合和分析,获得了能够准确描述沉积铂样片的二次电子发射特性的模型参数,并用获得的实验数据和相关拟合参数对Ku频段阻抗变换器的二次电子倍增效应进行了仿真分析.结果表明,通过沉积铂可大幅提高部件的二次电子倍增效应功率阈值.

2 实验

2.1 样片的制备

为了尽可能保证实验所用样片的二次电子发射特性与实际微波部件的一致,制备样片所使用的材料、加工方式和电镀工艺与制造微波部件的完全一致.首先用机械加工方式制备了尺寸为20 mm × 12 mm × 1 mm的铝合金片,表面粗糙度为0.8 μm,随后在其上电镀约7 μm厚的银.镀银完成后将一部分样片保存于干燥箱中,作为对比样片.剩余部分置于乙醇中超声清洗5 min,用氮气吹干后将其放入真空腔体,采用磁控溅射方法在表面沉积铂薄膜,厚度为100 nm.磁控溅射时腔体的真空度为3 × 10⁻³ Torr (1 Torr = 1.33 × 10² Pa),沉积速率为0.4 Å/s,溅射完成后保存于干燥箱中.

2.2 SEY的测试

样片二次电子发射特性的测试是在我们自建的平台完成的^[18],平台的核心部件是DESA150

型双通道筒镜型电子能谱仪,能谱仪内置同轴电子枪,电子束的能量在20—5000 eV范围内可调,束流强度为0.05 nA—2 μA,束斑直径几十微米到几个毫米,关于该平台更详细的介绍参见文献^[20].

测量SEY的方法主要有收集极法和偏压电流法^[20],本文采用偏压电流法,示意图见图1所示,用Keithley 6487E型皮安表测量电流.首先在样片上加+500 V的直流偏压,测量某一能量的电子束照射样片时的电流.由于激发的绝大部分二次电子的能量小于500 eV,因此这部分二次电子会在电场的作用下返回金属样片,这样测得的样片电流就是入射电子电流.为了收集二次电子并获得二次电子电流,在样片上加-20 V的直流偏压,此时激发的二次电子被排斥离开金属样片,将测得的样片电流记为 I_N .金属样片的导电性很好,不会存在电荷积累,根据SEY的定义

$$\delta = \frac{I_{se}}{I_{pe}} = 1 - \frac{I_N}{I_{pe}}, \quad (1)$$

可由测得的电流计算得到SEY的具体数值.(1)式中 δ 是SEY, I_{pe} 是入射电子电流, I_{se} 是二次电子电流.

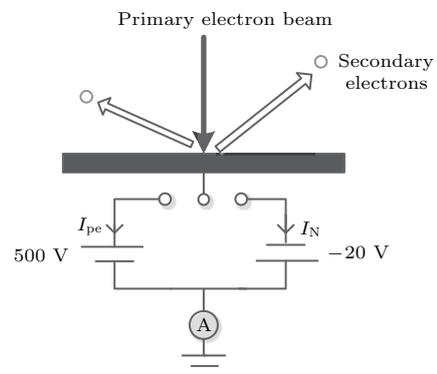


图1 偏压电流法测量SEY示意图

Fig. 1. Schematic diagram of SEY measurement with biased current method.

3 测量结果与分析

3.1 二次电子发射特性测量结果

沉积铂样片的SEY以及二次电子能谱测量结果见图2所示.对于微波部件的二次电子倍增效应,主要关注的是能量低于1500 eV的入射电子所激发的二次电子,因此只测量了入射电子能量 E_{pe} 在40—1500 eV范围内的SEY.从图2(a)可以看出,沉积铂样片SEY曲线的第一能量交叉点为

70 eV, SEY 的最大值为 1.77. SEY 先随着 E_{pe} 的增大而增大, 在 600 eV 处达到最大值 1.77, 当 E_{pe} 超过 600 eV 时 SEY 随着 E_{pe} 的增大而减小. 图 2(b) 所示的是 E_{pe} 为 300 eV 时的二次电子能谱, 即二次电子数量与二次电子能量 E_k 的关系. 测量时为了收集二次电子, 给样品施加了 -20 V 的直流偏压.

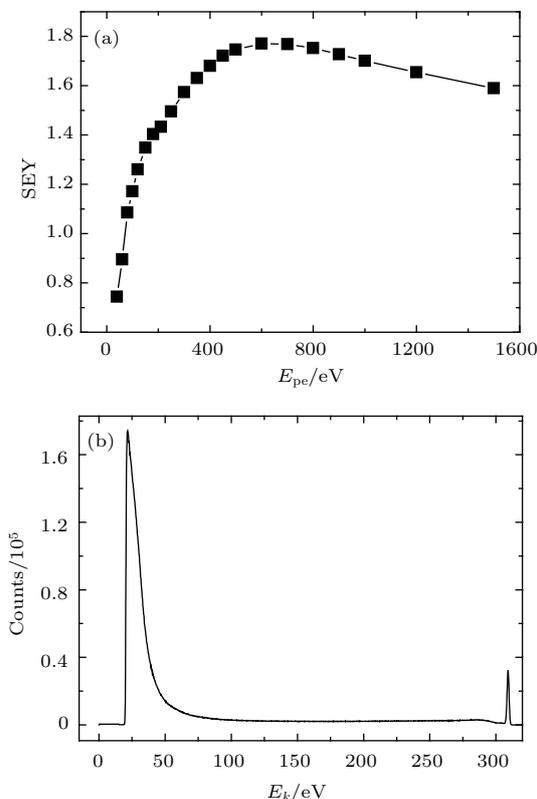


图 2 沉积铂样片的二次电子发射特性 (a) SEY 曲线; (b) 二次电子能谱
Fig. 2. Secondary electron emission properties of Platinum-deposited sample: (a) SEY curve; (b) secondary electron spectroscopy.

图 2(b) 清晰地显示了沉积铂样片的二次电子峰和弹性散射峰. 二次电子峰的起始位置在 19.5 eV, 弹性峰的峰值位置为 309.2 eV. 具有一定能量的电子束与固体相互作用时, 根据入射电子束的能量是否发生变化可分为弹性散射和非弹性散射. 一部分入射电子受原子的库仑势作用使其的运动轨迹发生大的角度变化, 而能量基本没有发生变化, 这部分电子从表面逸出后成为弹性散射电子. 其余的入射电子一部分与材料内的原子发生非弹性碰撞, 将能量传递给发生碰撞的原子后逸出表面, 这部分电子是非弹性散射电子, 还有一部分电子在发生非弹性散射时, 引起材料内部大量的电子被激发, 这些激发出来的电子克服表面势垒从表面

逸出成为真二次电子. 从能谱上看, 能量小于 50 eV 的出射电子是真二次电子, 能量大于 50 eV 的是背散射二次电子 (非弹性散射电子) 和弹性散射二次电子.

图 3 所示的是铝合金镀银样片以及沉积铂样片的 SEY 对比结果, 从图中可以看出通过沉积铂能明显降低铝合金镀银样片在低能量端的 SEY. 铝合金镀银样片的 SEY 最大值为 2.40, 对应的 E_{pe} 为 300 eV, 第一能量交叉点为 30 eV (通过外推获得). 而沉积了铂的样片的 SEY 最大值为 1.77, 对应的 E_{pe} 为 600 eV, 第一能量交叉点为 70 eV, SEY 最大值的降幅为 26%.

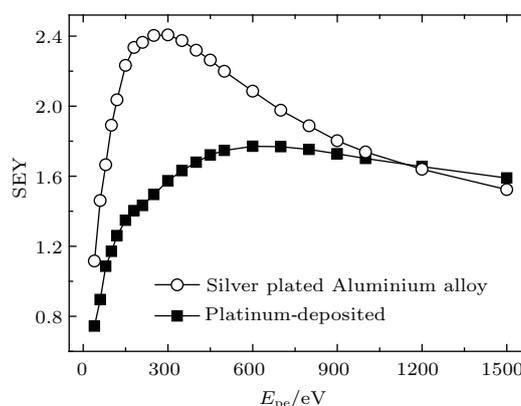


图 3 铝合金镀银样片以及沉积铂样片的 SEY 曲线
Fig. 3. SEY curves of Silver plated Aluminium alloy and Platinum-deposited sample.

3.2 二次电子发射特性参数拟合

星载大功率微波部件在设计时, 需要进行仿真分析并确定二次电子倍增效应击穿功率阈值, 从而确保在轨工作时处于安全功率范围内. 而进行此类仿真分析的前提是获得部件表面准确的 SEY 和二次电子能谱模型及相关参数 [21]. 目前针对金属材料建立的 SEY 模型较多, 常用的主要有半经验模型、Vaughan 模型、Furman 模型和 Scholtz 模型等. 半经验模型是通过分析入射电子在固体表面内产生二次电子的数目以及其逃逸出表面的概率, 通过积分得到 SEY 和 E_{pe} 的关系式. SEY 可表示为 [7]

$$\delta(E_{pe}) = \int n(x, E) f(x) dx, \quad (2)$$

(2) 式中 $n(x, E)$ 是入射电子在固体内部 x 处产生的二次电子数量, E 是入射电子在固体内部时的能量, $f(x)$ 是 x 处产生的二次电子逃逸出表面的概率.

逃逸概率通常假设具有如下的形式:

$$f(x) = B e^{-x/\alpha}, \quad (3)$$

其中 B 是小于 1 的常数, 可以理解为表面处的逃逸概率, α 是平均逃逸深度. 通常假设产生的二次电子数目 $n(x, E)$ 正比于单位长度的能量损失 (即阻止本领):

$$n(x, E) = -\frac{1}{\varepsilon} \frac{dE}{dx}, \quad (4)$$

其中 ε 是产生一个二次电子所需要的平均能量. Young 认为入射电子在固体内部的能量损失几乎是常数 [22], 因此有

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{E_{pe}}{R}, \quad (5)$$

其中 R 是入射电子的穿透深度或作用范围. 最终得到

$$\delta = B \frac{E_{pe}}{\varepsilon} \frac{\alpha}{R} (1 - e^{-R/\alpha}), \quad (6)$$

(6) 式给出的 SEY 与具体的材料参数以及入射电子的穿透深度有关, 更为常用的是归一化的半经验公式 [23]:

$$\frac{\delta(E_{pe})}{\delta_m} = A y^{1-n} (1 - e^{-by^n}), \quad (7)$$

(7) 式中的 $y = E_{pe}/E_{pem}$, 是归一化的入射能量, E_{pem} 是 SEY 最大值对应的 E_{pe} ; δ_m 是二次电子产额最大值; A , b 和 n 是系数. 由于 SEY 存在极值, 因此 (7) 式中的 A , b 和 n 这三个系数并不独立. 根据 $\delta(E_{pem}) = \delta_m$ 以及 $\left. \frac{d\delta}{dE_{pe}} \right|_{E_{pe}=E_{pem}} = 0$, 可得关系式:

$$A = 1/(1 - e^{-b}), \quad (8)$$

$$n = (e^{-b} - 1)/[e^{-b}(b + 1) - 1], \quad (9)$$

n 的值通常取 1.35 [23], 在 Lin 等 [7] 的报道中 n 的值取为 1.67.

除了半经验模型外, 还有 Vaughan 模型、Furman 模型和 Scholtz 模型 [24-26]. Vaughan 提出的模型较为常用, 其数学形式为 [24]:

$$\frac{\delta(E_{pe})}{\delta_m} = \begin{cases} (ze^{1-z})^k, & k = 0.56, \quad z \leq 1, \\ (ze^{1-z})^k, & k = 0.25, \quad 1 < z \leq 3.6, \\ 1.125z^{-0.35}, & z > 3.6, \end{cases} \quad (10)$$

(10) 式中的 $z = \frac{E_{pe} - E_0}{E_{pem} - E_0}$, k 是系数, 系数 E_0 通常取 12.5 eV. Furman 和 Pivi [25] 以及 Scholtz 等 [26] 提出的模型分别为:

$$\frac{\delta(E_{pe})}{\delta_m} = \frac{ny}{n - 1 + y^n}, \quad (11)$$

$$\frac{\delta(E_{pe})}{\delta_m} = e^{-\frac{\ln^2 y}{2v}}, \quad (12)$$

(11) 和 (12) 式中 y 的定义与 (7) 式中的相同. (11) 式中的系数 n 常取值 1.35, (12) 式中的系数 v 取值 1.6.

对于二次电子能谱的模型, Chung [1] 在研究中给出了描述金属材料低能端的二次电子能谱公式, 即

$$\frac{\partial \delta}{\partial E_k} = \frac{AE_k}{(E_k + W)^4}, \quad (13)$$

其中 A 是系数, W 是材料的功函数. 由 (13) 式可知当 $E_k = 0$ 时二次电子的数目为 0, 并且二次电子能谱存在极值, 极值所对应的能量是 $W/3$.

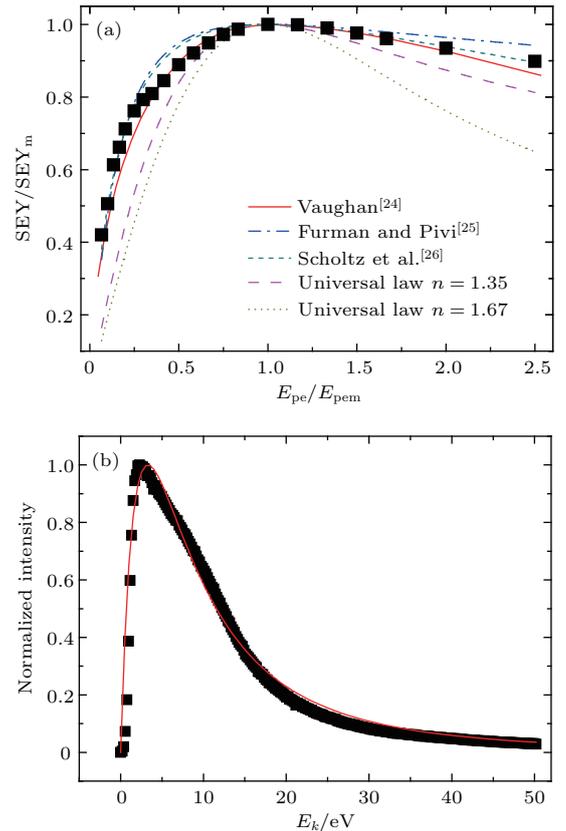


图 4 沉积铂样片的二次电子发射特性的拟合结果 (a) SEY; (b) 二次电子能谱
Fig. 4. Fitted results of secondary electron emission properties of Platinum-deposited samples: (a) SEY; (b) secondary electron spectroscopy.

为了获得能够准确描述沉积铂样片的SEY和二次电子能谱特性的模型,为实际工程中相关二次电子倍增效应功率阈值仿真提供数据参考,分别用上述模型对SEY和二次电子能谱实验数据进行了拟合,结果见图4.由图4(a)可以看出,在低能端Furman模型和Scholtz模型与实验数据符合得较好,Vaughan模型次之;而在中间能量区间Vaughan模型符合得比较好;在 $E_{pe}/E_{pem} > 2$ 的高能区间,Scholtz模型则符合得最好.常用的经验公式则与实验数据的偏差最大,无法准确拟合样片的SEY.综合来看,在40—1500 eV能量范围内,只有Vaughan模型能够准确描述样片二次电子产额特性.在对二次电子能谱进行拟合时,根据 $E_k = 0$ 时二次电子的数目为0这一条件对能量进行了修正.将图2(b)中横坐标为19.5 eV处重新标定为能量零点后进行拟合,拟合结果见图4(b)所

示.可以看出Chung-Everhart公式能够较好地拟合0—50 eV范围内的二次电子能谱曲线,拟合得到的 W 值为9.9 eV.

3.3 二次电子倍增效应功率阈值仿真

为了验证沉积铂薄膜对镀银微波部件二次电子倍增效应的抑制效果,以Ku频段阻抗变换器为研究对象,分别将获得的铝合金镀银样片和沉积铂样片的二次电子发射特性实验数据和相关拟合参数导入仿真软件,对二次电子倍增效应功率阈值进行仿真分析.阻抗变换器的结构尺寸见图5所示.仿真结果显示使用铝合金镀银样片和沉积铂样片的二次电子发射特性数据的功率阈值分别为7500 W和36000 W,这表明通过在表面沉积铂薄膜,可以将二次电子倍增效应功率阈值提升4.8倍.

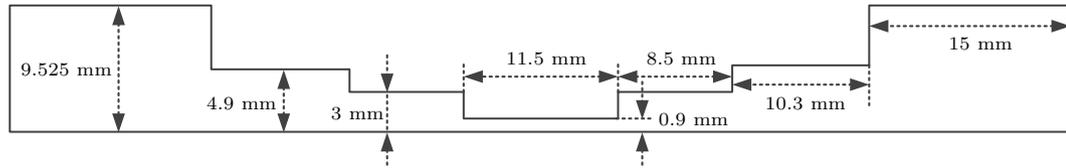


图5 Ku频段阻抗变换器结构示意图

Fig. 5. Schematic diagram of Ku-band impedance transformer.

4 讨论

出射的二次电子来自于材料表层,其反映的是材料表层的一些性质,因此铂的厚度是一项关键参数.入射电子激发的二次电子只有逃逸出材料后才会对SEY有贡献.入射电子在材料内部的作用范围与其能量成正比,能量越高作用范围越大,而二次电子产生时的位置越深,其逃逸出表面的概率越小.铂层的厚度如果小于入射电子的作用范围和内二次电子的逃逸深度(大约在10 nm以内),则逃逸出表面的二次电子不仅来源于铂层,还有来自镀银层以及夹在铂层和镀银层之间的化学反应层、吸附层和玷污层的,因此铂层厚度较薄时不能完全抑制来自镀银表面的二次电子发射.当铂层厚度超过了二次电子的逃逸深度后,尽管入射电子的作用范围超过了表面铂层,但最终从表面逃逸出的二次电子完全来源于逃逸深度范围内的铂层,出射的二次电子仍然主要取决于表面铂层.根据Lane和Zaffarano^[27]的研究结果,以1500 eV能量的入射

电子为例,其在铂材料中的作用范围大约为7 nm.另外,Lin和David^[7]的研究结果显示铂材料的二次电子的有效逃逸深度为0.5 nm.由这些研究结果可知本文测得的沉积铂样片的二次电子发射特性完全来自于铂薄膜,100 nm厚的铂对于抑制镀银表面的二次电子发射是足够的.抑制银表面二次电子发射所需铂薄膜的厚度在百纳米量级,采用磁控溅射技术沉积此厚度的薄膜时铂的消耗量很小,不会导致器件成本明显增加.在二次电子能谱拟合方面,由(13)式可知二次电子能谱曲线存在极值,极值所对应的能量是 $W/3$,因此理论上通过读取峰值位置就可获得材料的功函数.但是实际在测量二次电子能谱时,为了收集出射的电子,通常会给样片施加一定的负偏压(本文中是-20 V),这会导致能谱有一定的偏移,而且此偏压对高能端和低能端电子能量的影响并不一致.以图2(b)所示的能谱为例, E_{pe} 是300 eV,而二次电子能谱上弹性峰所对应的能量大约是309.2 eV,二次电子峰起始位置对应的能量大约是19.5 eV.理论上弹性峰对应的能

量应该是 300 eV, 二次电子峰起始位置对应的能量应是 20 eV. 实际测量值与理论值的偏差可能是由多种因素造成的, 因此不能简单地通过读取峰值来计算 (13) 式中的功函数, 而应该通过拟合的方法. 在拟合时, 对二次电子能谱的横坐标 (能量) 进行修正, 将二次电子峰起始位置对应的能量标为零点, 并将能谱归一化后进行拟合得到功函数, 这样得到的结果更为可信. 此外, 本文所测得的镀银样片的 SEY 最大值是 2.4, 与文献 [17] 中报道的银箔的一致, 而文献 [16, 28] 报道的镀银样片的 SEY 最大值分别为 2.15 和 2, 比本文的结果分别小 10.4% 和 16.7%. 材料的表面状况, 比如表面化学反应、吸附和玷污等难以量化, 但是对 SEY 影响很大. 这些文献包括本文都未对样片进行特殊处理 (如离子清洗) 以去除表面的化学反应层、吸附层和玷污层, 材料表面状况的差异可能是导致本文 SEY 的测量结果比其他文献报道的大以及不同研究组报道的镀银以及纯银样片的 SEY 测量值离散程度大的原因.

5 结 论

本文采用磁控溅射沉积金属薄膜的方法抑制镀银表面的二次电子发射, 通过沉积 100 nm 厚的铂薄膜, 将铝合金镀银样片的 SEY 最大值由 2.40 降低至 1.77. 通过拟合, 获得了能够准确描述沉积铂样片二次电子产额和二次电子能谱特性的模型及其参数. 在此基础上, 利用获得的实验数据和相关拟合参数对 Ku 频段阻抗变换器的二次电子倍增效应功率阈值进行了仿真, 结果表明通过沉积铂可将阻抗变换器的功率阈值提升 4.8 倍. 本文采用沉积导电性能良好的低 SEY 金属抑制镀银表面的二次电子发射, 不会改变部件的电性能, 因此本文的研究结果对电性能要求严苛情况下的微波部件二次电子倍增效应抑制具有重要的参考价值. 此外, 相关测量结果可为金属材料二次电子发射特性的研究提供数据参考.

参考文献

- [1] Chung M S 1974 *J. Appl. Phys.* **45** 707
- [2] Ding Z J, Tang X D, Shimizu R 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 718

- [3] Xie A G, Zhang J, Liu B, Wang T B 2012 *High Power Laser and Particle Beams* **24** 481 (in Chinese) [谢爱根, 张健, 刘斌, 王铁邦 2012 强激光与粒子束 **24** 481]
- [4] Chang T H, Zheng J R 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 241401 (in Chinese) [常天海, 郑俊荣 2012 物理学报 **61** 241401]
- [5] Cheng S B, Deng S Q, Yuan W J, Yan Y J, Li J, Li J Q, Zhu J 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 032901
- [6] Yang J, Cui W Z, Li Y, Xie G B, Zhang N, Wang R, Hu T C, Zhang H T 2016 *Appl. Surf. Sci.* **382** 88
- [7] Lin Y H, David C J 2005 *Surf. Interface Anal.* **37** 895
- [8] Cazaux J 2010 *Ultramicroscopy* **110** 242
- [9] Cazaux J 2012 *J. Electron Microsc.* **61** 261
- [10] Cheng H, Jiang J P 1986 *Cathode Electronics* (Xian: Northwest Telecommunication Engineering Institute Press) p164 (in Chinese) [承欢, 江剑平 1986 阴极电子学 (西安: 西北电讯工程学院出版) 第 164 页]
- [11] Stratakis D, Gallardo J C, Palmer R B 2010 *Nucl. Instrum. Meth. A* **620** 147
- [12] Ding M Q, Huang M G, Feng J J, Bai G D, Li X H, Zhao Q P, Liu M H, Gao Y J, Chen Q L 2009 *Chin. J. Vac. Sci. Technol.* **29** 247 (in Chinese) [丁明清, 黄明光, 冯进军, 白国栋, 李兴辉, 赵青平, 刘明辉, 高玉娟, 陈其略 2009 真空科学与技术学报 **29** 247]
- [13] Zhang N, Cui W Z, Hu T C, Wang X B 2011 *Space Elec. Tech.* **08** 38 (in Chinese) [张娜, 崔万照, 胡天存, 王新波 2011 空间电子技术 **08** 38]
- [14] Ye M, He Y N, Hu S G, Wang R, Hu T C, Yang J, Cui W Z 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 074904
- [15] Nistora V, González L A, Aguilera L, Montero I, Galán L, Wochner U, Raboso D 2014 *Appl. Surf. Sci.* **315** 445
- [16] Ye M, He Y N, Wang R, Hu T C, Zhang N, Yang J, Cui W Z, Zhang Z B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 147901 (in Chinese) [叶鸣, 贺永宁, 王瑞, 胡天存, 张娜, 杨晶, 崔万照, 张忠兵 2014 物理学报 **63** 147901]
- [17] Montero I, Aguilera L, Dávila M E, Nistor V C, González L A, Galán L, Raboso D, Ferrittoet R 2014 *Appl. Surf. Sci.* **291** 74
- [18] Cao M, Zhang X S, Liu W H, Wang H G, Li Y D 2017 *Diam. Relat. Mater.* **73** 199
- [19] Cazaux J 2010 *Appl. Surf. Sci.* **257** 1002
- [20] Zhang N, Cao M, Cui W Z, Zhang H B 2014 *Chin. J. Vac. Sci. Technol.* **34** 554 (in Chinese) [张娜, 曹猛, 崔万照, 张海波 2014 真空科学与技术学报 **34** 554]
- [21] Li Y, Cui W Z, Wang H G 2015 *Phys. Plasmas* **22** 053108
- [22] Young J R 1957 *J. Appl. Phys.* **28** 524
- [23] Lye R G, Dekker A J 1957 *Phys. Rev.* **107** 977
- [24] Vaughan J R M 1993 *IEEE Trans. Electron Dev.* **40** 830
- [25] Furman M A, Pivi M T F 2002 *Phys. Rev. Top-AC* **5** 124404
- [26] Scholtz J J, Dijkkamp D, Schmitz R W A 1996 *Philips J. Res.* **50** 375
- [27] Lane R O, Zaffarano D I 1954 *Phys. Rev.* **94** 960
- [28] Zhang H B, Hu X C, Cao M, Zhang N, Cui W Z 2014 *Vacuum* **102** 12

Suppressing secondary electron emission from silver-plated surface by magnetron sputtered platinum*

He Yun¹⁾ Yu Bin²⁾ Wang Qi¹⁾ Bai Chun-Jiang¹⁾ Yang Jing¹⁾ Hu Tian-Cun¹⁾
Xie Gui-Bai¹⁾ Cui Wan-Zhao^{1)†}

1) (National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China)

2) (School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 26 December 2017; revised manuscript received 7 February 2018)

Abstract

The multipactor effect has to be dealt with seriously when designing and manufacturing high power microwave devices used in space, as it will cause irreversible damage to devices and hence the whole system fails to work. Lowering the secondary electron yield of device surface is an effective way to suppress multipactor effect, which can be realized by creating trapping structure or depositing nonmetallic materials with low secondary electron yield on the surface. However, these treatments will result in electrical performance changing even to an unacceptable extent in some cases. To solve this problem, the deposited materials with conductivity as good as metals' should be used, besides, they should be chemically inactive in air. Taking the above into account, the method of suppressing the secondary electron yield of silver plated surface of device by magnetron sputtering platinum is proposed and investigated in the present paper. Firstly, platinum film with a thickness of 100 nm is deposited on silver plated aluminum alloy substrates by magnetron sputtering, and secondary electron yields of substrates with and without deposited platinum film are measured with the bias current method. The experimental results indicate that the maximum value of secondary electron yield and the first cross energy of silver plated aluminum alloy sample are 2.40 and 30 eV, respectively. After depositing platinum film on sample, these values change to 1.77 and 70 eV, a reduction of 26% in maximum of secondary electron yield is achieved. Secondly, universal law, Vaughan model, Furman model and Scholtz model are used to fit the experimental data of secondary electron yield, and the results indicate that only Vaughan model accords well with the property of secondary electron yield in an energy range of 40–1500 eV, and corresponding parameters are also obtained. The Chung-Everhart model is used to fit the secondary electron spectrum curve, and the fitted work function is 9.9 eV. Finally, the simulation of multipactor threshold of Ku-band impedance transformer is carried out by using a software with utilizing the experimental data and fitted results of secondary electron emission of samples. The simulation results indicate that the multipactor thresholds by utilizing the data of samples with and without platinum are 7500 W and 36000 W, respectively, which means that the large increase of multipactor threshold of high power microwave device can be achieved by depositing platinum film on the surface. The method proposed and results obtained in the present work provide a reference not only for studying the secondary electron emission of metal, but also for suppressing the multipactor effect of high power microwave device.

Keywords: secondary electron yield, multipactor effect, metallic film, platinum

PACS: 79.20.Hx, 73.43.Cd

DOI: 10.7498/aps.67.20172740

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U1537211, 11675278, 51675421).

† Corresponding author. E-mail: cuiwanzhao@126.com