

用于电真空器件的金属材料蒸发特性

刘燕文 王小霞 陆玉新 田宏 朱虹 孟鸣凤 赵丽 谷兵

Study on evaporation from alloys used in microwave vacuum electron devices

Liu Yan-Wen Wang Xiao-Xia Lu Yu-Xin Tian Hong Zhu Hong Meng Ming-Feng Zhao Li Gu Bing

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 068502 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.068502

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.068502>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I6>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种平行栅碳纳米管阵列阴极的场发射特性研究

[Field emission properties from a carbon nanotube array with parallel grid](#)

物理学报.2013, 62(24): 248502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.248502>

基于开槽单矩形栅和圆形电子注的W波段返波振荡器

[Design and simulation of W-band BWO based on slotted single-grating and cylindrical beam](#)

物理学报.2013, 62(15): 158503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.158503>

高增益相对论速调管放大器杂模振荡抑制研究

[Investigation of suppression of non-working mode oscillation in a high gain relativistic klystron amplifier](#)

物理学报.2012, 61(22): 228501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.228501>

140GHz大功率交错双栅行波管的设计和模拟研究

[Design and simulation of 140 GHz high power staggered double vane traveling-wave tube](#)

物理学报.2012, 61(17): 178501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.178501>

栅控电子枪中轮辐栅网截止放大系数的研究

[A study on the cut-off amplification factor of the grid with film sphere and porous structure in grid-controlled electron gun](#)

物理学报.2012, 61(7): 078502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.078502>

用于电真空器件的金属材料蒸发特性*

刘燕文[†] 王小霞 陆玉新 田宏 朱虹 孟鸣凤 赵丽 谷兵

(中国科学院电子学研究所, 北京 100190)

(2015年9月23日收到; 2015年12月22日收到修改稿)

随着现代通信卫星技术的发展,对微波真空电子器件的寿命和可靠性提出了更高的要求,广泛应用于微波真空电子器件的蒙乃尔、不锈钢等金属材料的蒸发性能直接影响器件的可靠性和寿命.本文采用飞行时间质谱仪(TOFMS)研究金属材料蒸发性能.利用TOFMS测试了真空本底、蒙乃尔、不锈钢等各种金属材料蒸发物的成分和大小.测试结果表明TOFMS具有很高的灵敏度,是一种非常快捷的研究金属材料蒸发的实验手段.测试结果发现在远低于Mn, Cu及Cr熔点的温度下,蒙乃尔、不锈钢材料加热到800 °C左右时就开始出现Mn, Cu元素的蒸发,在900 °C时就有大量Mn, Cu和Cr元素的蒸发,这些蒸发物蒸发到绝缘陶瓷上会使电子枪的绝缘性能下降,因而蒙乃尔和不锈钢不适用于阴极电子枪零件,尤其不适用于长寿命高真空器件的阴极电子枪零件以及其他容易受到电子轰击的零件(如阳极、收集极等).研究了在超高真空状态下加热时间对蒙乃尔和不锈钢材料表面结构的影响.发现蒙乃尔和不锈钢在900 °C的温度下加热一段时间后,其表面结构有了很大的变化,出现了大量的孔洞和晶界,并且随着处理时间的延长,材料的晶粒间界逐渐变大,从而使材料的强度下降、出现渗气甚至漏气等现象,因此蒙乃尔和不锈钢材料制作的零件尤其是薄壁零件不宜长时间在超高真空状态下高温加热.结合相关的理论知识对此现象进行了详细的分析.

关键词: 微波真空电子器件, 蒸发, 飞行时间质谱, 金属材料**PACS:** 85.45.Bz, 82.80.Rt, 61.66.Dk, 68.37.Hk**DOI:** 10.7498/aps.65.068502

1 引言

微波真空电子器件广泛应用于卫星通信、加速器、雷达、可控热核聚变、全球定位及未来军事前沿的高功率微波武器^[1-3]等方面.随着现代微波技术的发展,微波器件对频率、带宽、功率等工作特性不断提出新的要求,这些需求主要表现在要求更高的频率、更宽的频带、更大的功率、更高的效率和新的工作特性^[4-6].材料是电真空微波技术发展的物质基础,器件的技术是否先进,产品的质量能否得到保证,材料的性能是一个重要因素^[7-10].目前,真空微波电子器件在制造过程中所用材料约有60大类和4000个以上的品种,包括了自然界中70%以上的元素,应用领域十分广泛^[11].微波真空电子器件的管壳或电极材料在高温或电子轰击下产

生的蒸气是管内气源之一,也是物质迁移的重要因素.蒸发的金属原子沉积到其他电极上,将改变这些材料的表面特性,它直接影响微波真空电子器件的真空性能、绝缘性能、电子发射、对光和热的辐射与反射^[12-15],进而影响微波器件及卫星的性能和寿命.因此研究应用于高效率、高频率、高功率、宽频带微波真空电子器件的金属材料的蒸发性能,对于推动微波器件及卫星通信等技术的发展具有重要的意义.此外金属材料的蒸发现象涉及材料、物理、化学、电子学等多学科领域,因此对许多尚不清楚的蒸发机理问题的研究也具有十分重要的学术价值^[16-20].

阴极电子枪作为电真空微波器件中最为核心的部分,其性能好坏直接影响微波器件的性能和寿命^[21-23],阴极电子枪零件材料应具有耐高温、饱和蒸气压低、无磁性的特点.目前主要有不锈钢、蒙

* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2013CB328900)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: liuyanwen58@sina.com

乃尔、无氧Cu、钼等几种材料. 无磁蒙乃尔具有强度高、延性好、可焊性好及优良的耐蚀能力. 蒙乃尔在电真空器件中主要用来做电子枪零件和管壳等要求无磁性的零部件^[24]. 不锈钢合金作为微波电真空器件中最常用的金属外壳材料, 由于其具有良好的真空钎焊性能, 固其在电真空器件中主要用来做管壳等. 分析无磁蒙乃尔材料和不锈钢材料的蒸发性能对于提高微波电真空器件性能具有十分重要的意义.

2 样品制备和实验装置

2.1 样品制备

样品由金属材料车制成直径为4 mm圆筒形状, 在圆筒内部放置热子, 其结构如图1所示.

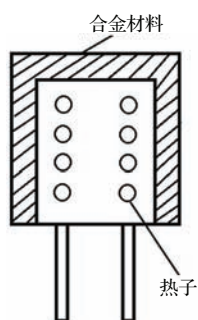


图1 金属材料—热子结构图

Fig. 1. The structure of the alloy-heater module.

热子是电真空微波器件中加热的零件, 材料主要选用钨、钨钼、钨铼、钨钨等^[25]. 本实验采用复绕热子结构, 如图2所示.

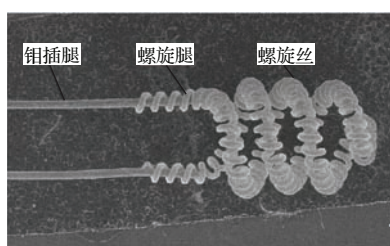


图2 复绕热子结构图

Fig. 2. Photograph of heater.

热子通电产生焦耳热可以将金属材料加热到1000 °C左右, 金属材料加热到一定温度后将会产生各种蒸发物质.

2.2 实验装置

有许多方法可以测量材料的蒸发, 主要的方法是石英晶体振荡法^[25,26], 石英晶体片的谐振频率会被蒸发到晶片上的蒸发物所改变, 把谐振频率的变化检测出来即可得到材料的蒸发率. 但这种方法的测量误差较大, 另外这种方法是一种积累效应, 一般需要数小时, 不能做到即时检测, 且不能区分蒸发物的成分, 同时受到温度的影响比较大^[27].

除了石英晶体振荡法方法外, 还有光学比较法^[28]、俄歇分析法^[29]、化学分析法^[30,31]、放射性同位素法等^[32]. 这些测量材料的蒸发方法中研究的主要是热阴极蒸发的Ba和BaO以及材料蒸发镀膜的厚度测试等^[33], 而蒙乃尔和不锈钢等材料在较低温度下的不同元素的蒸发现象并未见到研究报告.

本研究采用飞行时间质谱法(TOFMS)研究材料的蒸发, 将金属材料样品放入超高真空室内, 如图3和图4所示. 仪器由溅射离子泵、烘烤系统、飞行时间质谱仪、三维样品架(可同时放入三个以上样品)、观察窗等组成. 真空系统本底极限压强高于 5×10^{-8} Pa.

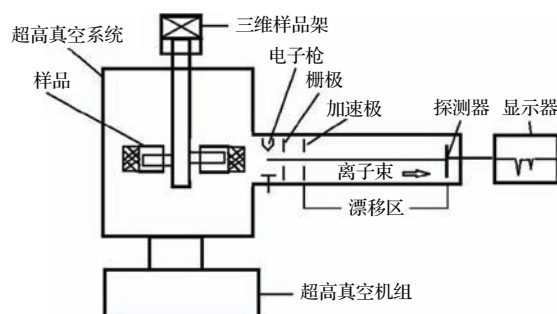


图3 金属材料蒸发性能测试系统结构图

Fig. 3. Schematic of experimental setup for evaporation of alloys.



图4 金属材料蒸发性能测试设备

Fig. 4. Time-of-flight mass spectrometer.

用于研究金属材料蒸发的TOFMS的工作原理: 在电离区中产生的正离子, 通过接有负电压的栅极引出, 然后由负高压的加速极加速, 经过漂移路程 L 后, 离子到达探测器, 探测器按漂移时间进行选择, 使给定的 M/e 的离子通过, 由接收器接收.

质量为 M 的离子飞行时间 T 与其质荷比 M/e 的关系为

$$T = \frac{L}{\sqrt{2V}} \sqrt{\frac{M}{e}}, \quad (1)$$

V 是 TOFMS 的加速电压. 测量离子的飞行时间就可求出离子的 M/e , 从而进行材料蒸发成分分析. 根据相同时间内到达探测器的离子数就可计算出该种成分在材料中的含量.

金属材料蒸发速率 V 与离子峰强度 I 的关系为 [34]

$$\nu = aI, \quad (2)$$

式中 a 为常数. 金属材料蒸发速率与离子峰强度成正比, 离子峰强度越大则金属材料蒸发速率越大.

这种方法的优点是能够分析金属材料蒸发物的成分, 仪器的机械结构简单; 仪器的性能指标主要依靠调节电参数而获得, 因此使用方便; 在短时间内记录任意反应过程的全部质谱, 给出反应的全部信息; 能实现快速扫描, 可用于监控极短的瞬时事件.

3 实验结果与讨论

首先利用 TOFMS 测试了真空本底的成分和强度. 图 5 给出了材料未加热时, 极限真空 4.0×10^{-8} Pa、测试时真空度在 1.0×10^{-7} Pa 的条件下, 真空本底的飞行时间质谱图.

从图 5 可看出, 在 1.0×10^{-7} Pa 的真空条件下, TOFMS 也可以测试出其中的 H_2 , H_2O , CO 或 N_2 ,

CO_2 , 并具有比较强的离子流强度, 说明 TOFMS 具有很高的灵敏度. 这一实验结果与文献 [31] 中采用四级质谱的测试结果是一致的 [35].

然后利用飞行时间质谱对蒙乃尔和不锈钢材料的蒸发特性进行了测试. 图 6 给出了蒙乃尔材料在不同温度时蒸发成分的质谱图. 材料在加热状态下, 测试时真空度好于 1.0×10^{-6} Pa.

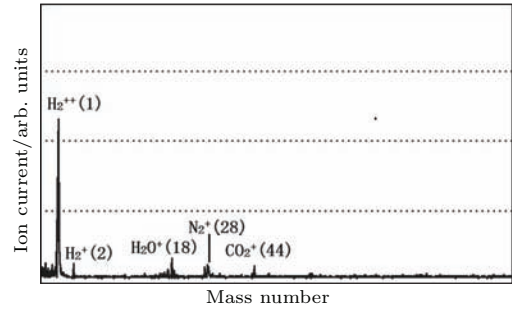


图 5 真空本底质谱图

Fig. 5. Mass spectra of the vacuum background.

从质谱图可看出蒙乃尔材料加热到 $750\text{ }^\circ\text{C}$ 时就开始有少量 Mn 和 Cu 蒸发, 随着温度的升高, Mn 和 Cu 蒸发量增大. 虽然这些温度远低于 Mn 和 Cu 的熔点, 但蒙乃尔材料还是出现了大量 Mn 和 Cu 蒸发物, 这是由于任何物质表面高能分子都有挥发成为气态的趋势, 其气态分子又不断地被碰撞而凝聚为液态或者凝华为固态的趋势. 在给定的温度下, 一种物质的气态与其凝聚态 (固态或液态) 之间会在某一个压强下存在动态平衡. 此时单位时间内由气态转变为凝聚态的分子数与由凝聚态转变为气态的分子数 i 相等, 这个压强就是此物质在此温度下的饱和蒸气压. 从蒸气压高低可以看出物体蒸发速率的大小, 具有较高蒸气压的物质具有较高的蒸发速率, 任何物质的蒸气压都随着温度非线性增加. 表 1 给出了蒙乃尔、不锈钢等金属材料所含的几种主要元素的温度与蒸气压的关系 [24].

表 1 构成蒙乃尔和不锈钢的主要元素的温度 (K) 与蒸气压 ($\times 133$ Pa) 的关系

Table 1. The relationship between the temperature (K) and vapor pressure ($\times 133$ Pa) of the major elements of Monel and stainless steel.

元素	熔点	蒸气压/ $\times 133$ Pa								
		10^{-11}	10^{-10}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}
温度/K										
Cu	1357	855	895	945	995	1060	1125	1210	1300	1405
Mn	1517	660	695	734	778	827	884	948	1020	1110
Cr	2176	960	1010	1055	1100	1175	1250	1335	1430	1540
Fe	1809	1000	1050	1105	1165	1230	1305	1400	1500	1615
Ni	1725	1040	1090	1145	1200	1270	1345	1430	1535	1655

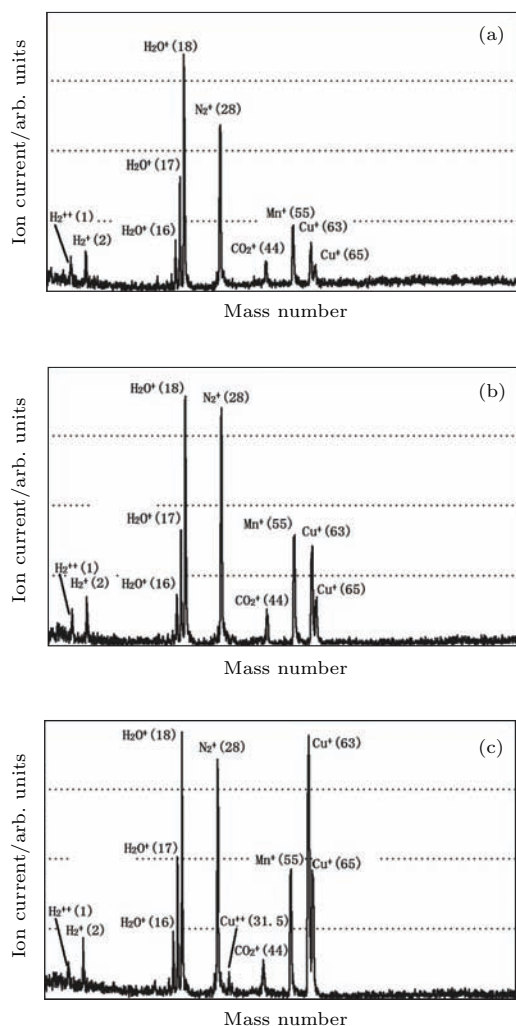


图6 蒙乃尔材料加热 (a) 754 °C; (b) 826 °C; (c) 862 °C时的质谱图
 Fig. 6. Mass spectra of the evaporants from monel of the heat treatment at (a) 754 °C; (b) 826 °C; (c) 862 °C.

在蒙乃尔合金中虽然Mn的含量(2%左右)远远小于Cu的含量(40%左右),但Mn的蒸气压很高,Mn的蒸气压高于Cu约3—4个量级,因此Mn的蒸发量比较大,这些蒸发物蒸发到绝缘陶瓷上会使电子枪的绝缘性能下降,因而蒙乃尔不适用于阴极电子枪零件,尤其不适用于高真空器件的阴极电子枪零件以及其他容易受到电子轰击的零件(如阳极、收集极等).

图7给出了不锈钢材料在不同温度时蒸发成分的质谱图.

从质谱图上可看出,不锈钢在800 °C时开始有少量Mn蒸发,在850 °C时就开始有较多的Mn和少量的Cr蒸发.不锈钢在900 °C时就有大量Mn和Cr蒸发.因而不锈钢不适用于阴极电子枪零件,尤其是长寿命高真空微波管电子枪零件.

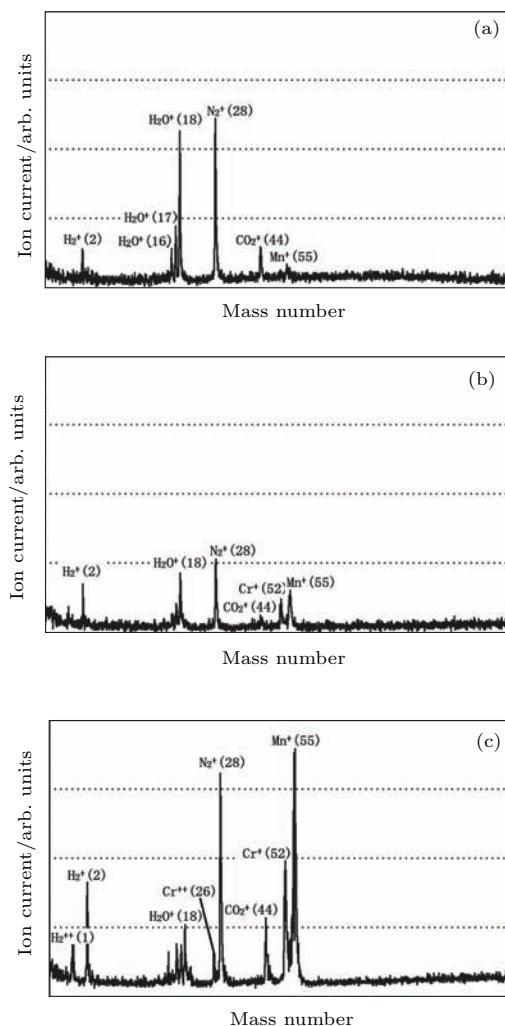


图7 不锈钢材料加热 (a) 817 °C; (b) 859 °C; (c) 900 °C时的质谱图
 Fig. 7. Mass spectra of the evaporants from the stainless steel of the heat treatment at (a) 817 °C; (b) 859 °C; (c) 900 °C.

长寿命高真空微波器件内部的真空度一般高于 10^{-6} Pa,其排气过程的温度一般高于500 °C.从表1可以看出,Mn元素在500 °C (773 K)其蒸气压达到 10^{-6} Pa,因此应避免将含有Mn元素高的合金材料用于长寿命高真空微波器件中.

图8给出了蒙乃尔材料900 °C (真空度 8.5×10^{-7} Pa)加热不同时间的扫描电镜(SEM)图及表面成分X-射线衍射(XRD)能谱图.

从图8可看出,蒙乃尔在900 °C的温度下,其表面结构和成分有了很大的变化,表面的Mn和Cu元素减少,出现了大量的孔洞和晶界,经过检漏,发现筒状的蒙乃尔已经漏气.

图9给出了不锈钢材料900 °C (真空度 8.5×10^{-7} Pa)加热不同时间的扫描电镜图.

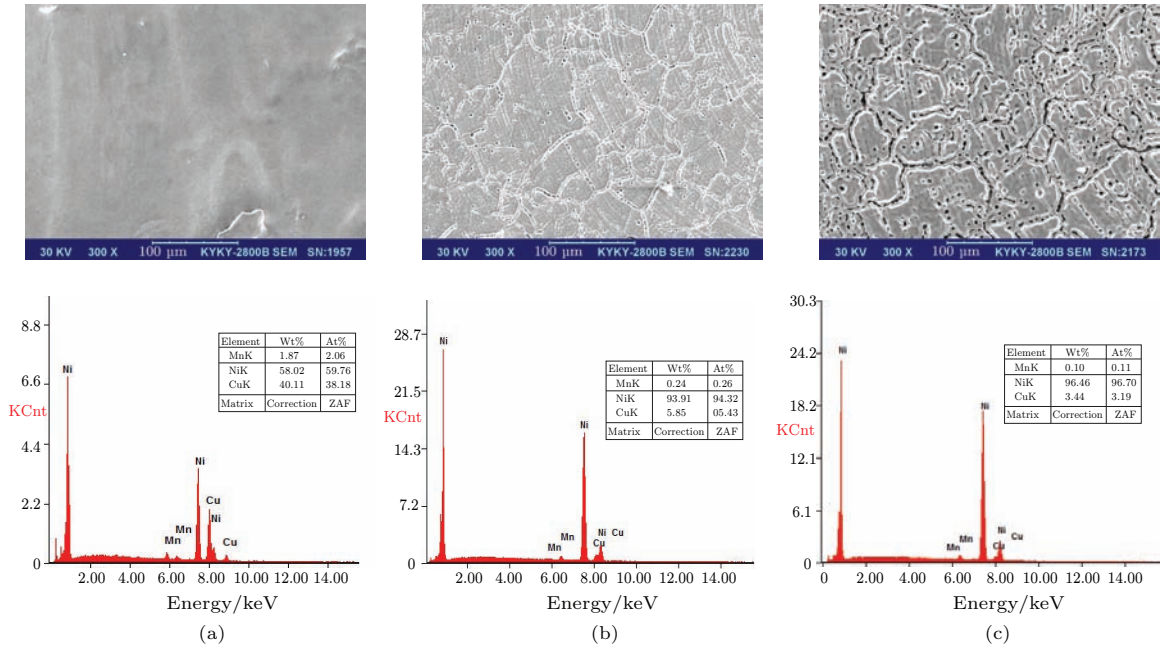


图8 蒙乃尔材料的SEM图和XRD (a) 未加热; (b) 900 °C加热30 min; (c) 900 °C加热120 min

Fig. 8. SEM images and XRD of the heat treatment on the monel: (a) Before the heat treatment; (b) after the heat treatment for 30 min at 900 °C; (c) after the heat treatment for 120 min at 900 °C.

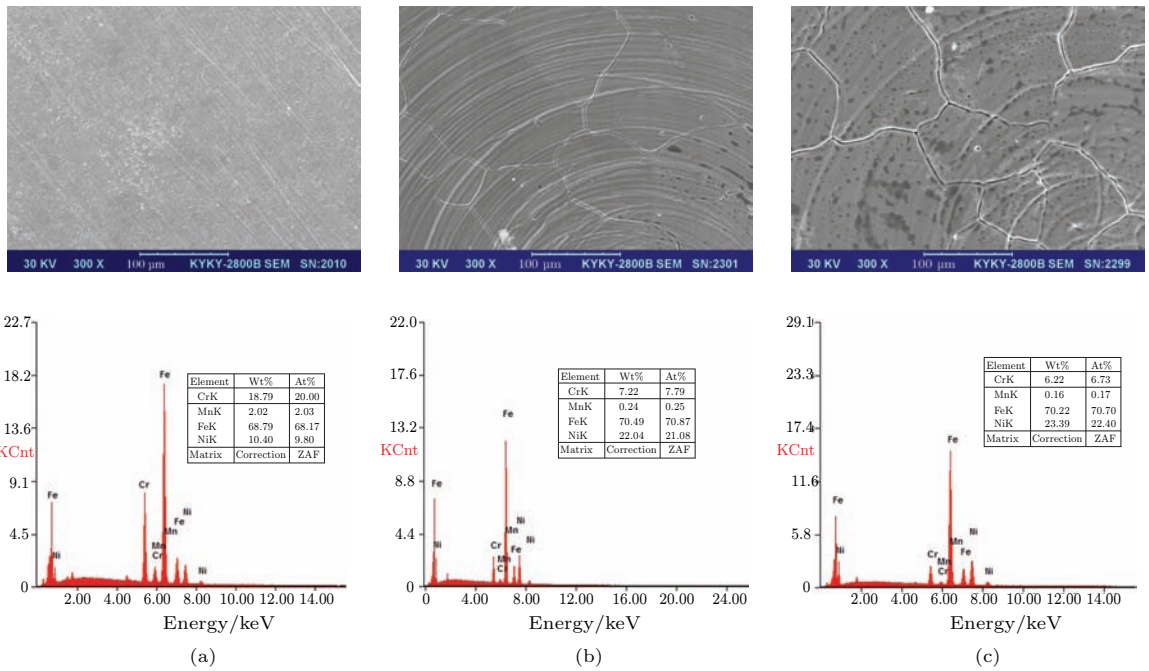


图9 不锈钢材料 (a) 未加热; (b) 900 °C加热30 min; (c) 900 °C加热120 min的SEM图和XRD

Fig. 9. SEM images and XRD of the heat treatment on the stainless steel: (a) Before the heat treatment; (b) after the heat treatment for 30 min at 900 °C; (c) after the heat treatment for 120 min at 900 °C.

从图9可看出, 不锈钢在900 °C的温度下, 其表面结构和成分有了很大的变化, 表面的Mn和Cr元素减少, 出现了大量的晶界, 经过检漏, 发现筒状的不锈钢已经漏气。

以上的实验证明蒙乃尔材料、不锈钢材料制作的零件尤其是薄壁零件不宜长时间高温加热, 因为

随着处理时间的延长和温度的提高, 蒙乃尔材料、不锈钢材料的成分会发生很大变化, 这种变化促使材料表面出现孔洞以及晶粒间界逐渐变大, 由于孔洞很难连接成漏气通道, 这一点在不锈钢表面可以更清楚地看出, 因此蒙乃尔材料、不锈钢材料渗气甚至漏气等现象的发生主要是因为晶粒间界连通

造成的.

4 结 论

利用 TOFMS 研究了广泛应用于微波真空电子器件的蒙乃尔、不锈钢等金属材料的蒸发性能, 这些蒸发物质将直接影响电真空微波器件的寿命和可靠性. 利用 TOFMS 测试了真空本底、蒙乃尔、不锈钢等各种金属材料蒸发物的成分和蒸发量. 实验结果表明: TOFMS 是一种非常快捷的研究金属材料蒸发的实验手段; 在远低于 Mn, Cu 及 Cr 熔点的温度下, 蒙乃尔材料加热到 750 °C 时就开始有少量 Mn 和 Cu 蒸发, 随着温度的升高, Mn 和 Cu 蒸发量增大; 不锈钢在 800 °C 时开始有少量 Mn 蒸发, 在 900 °C 时就有大量 Mn 和 Cr 蒸发, 这是由于在蒙乃尔和不锈钢合金中虽然 Mn 的含量 (2% 左右) 远远小于 Cu 和 Cr 的含量, 但 Mn 的蒸气压很高, Mn 的蒸气压高于 Cu 约 3—4 个量级, 高于 Cr 约 5 个量级, 因此 Mn 的蒸发量比较大. 这些蒸发物蒸发到绝缘陶瓷上会使电子枪的绝缘性能下降, 因而蒙乃尔和不锈钢不适用于阴极电子枪零件, 尤其不适用于长寿命高真空器件的阴极电子枪零件以及其他容易受到电子轰击的零件 (如阳极、收集极等), 并且应避免将含有 Mn 元素高的合金材料用于长寿命高真空微波器件中.

蒙乃尔和不锈钢材料在 900 °C 下加热一段时间后, 其表面结构和成分有了很大的变化, 表面的 Mn, Cu 和 Cr 元素大量减少, 同时出现了大量的孔洞和晶界, 并且随着处理时间的延长, 材料的晶粒间界逐渐变大, 从而使材料的强度下降, 出现渗气甚至漏气等现象, 因此蒙乃尔和不锈钢材料制作的零件尤其是薄壁零件不宜长时间高温加热.

参考文献

- [1] Liao F J 2006 *Acta Electr. Sin.* **31** 3513 (in Chinese) [廖复疆 2006 电子学报 **31** 3513]
- [2] Zhao P C, Liao C, Feng J 2015 *Chin. Phys. B* **24** 025101
- [3] Liu C, Wang Y H 2015 *Chin. Phys. B* **24** 010602
- [4] Shin Y M, Barnett L R, Gamzina D 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 181505
- [5] Chu K R 2004 *Rev. Mod. Phys.* **76** 2489
- [6] Sirigiri J R, Shaprio M A, Temkin R J 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 56302
- [7] Liu Y W, Wang X X, Zhu H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 234402 (in Chinese) [刘燕文, 王小霞, 朱虹 2013 物理学报 **62** 234402]

- [8] Shao W S, Zhang K, Li J, Yan S Q, Chen Q L 2003 *Appl. Surf. Sci.* **21** 554
- [9] Liu Y W, Tian H, Han Y 2012 *IEEE-Trans. on ED.* **59** I36184
- [10] Wang J S, Liu W 2008 *J. Phys. Chem. Solid* **69** 2103
- [11] Liao F J 1999 *Vacuum Electronics* (Beijing: Electronics Industry Press) (in Chinese) [廖复疆 1999 真空电子学 (北京: 电子工业出版社)]
- [12] Liu Y W, Tian H 2008 *Sci. China E* **38** 1515 (in Chinese) [刘燕文, 田宏 2008 中国科学 E **38** 1515]
- [13] Wang J S, Liu W 2009 *IEEE Trans. on ED* **56** 799
- [14] Liu Y W, Han Y, Zhao L 2009 *Acta. Electr. Sin.* **316** 1757 (in Chinese) [刘燕文, 韩勇, 赵丽 2009 电子学报 **316** 1757]
- [15] Wang X X, Liu Y W 2014 *IEEE-Trans. on ED.* **61** 605
- [16] Liu Y W, Wang X X, Tian H 2015 *Sci. China Infor. Sci.* **45** 145 (in Chinese) [刘燕文, 王小霞, 田宏 2015 中国科学 信息科学 **45** 145]
- [17] Liu Y W, Tian H, Han Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 535 (in Chinese) [刘燕文, 田宏, 韩勇 2009 物理学报 **58** 535]
- [18] Li J, Yu Z Q, Shao W S, Zhang K 2005 *Appl. Surf. Sci.* **25** 151
- [19] Wang X X, Liao X H, Luo J R 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1924 (in Chinese) [王小霞, 廖显恒, 罗积润 2008 物理学报 **57** 1924]
- [20] Li X P, Sun S P, Yu Y, et. al. 2015 *Chin. Phys. B* **24** 120502
- [21] Liu Y W, Tian H 2008 *Sci. China E* **51** 1497
- [22] Zhang M C, Liu Y W, Yu S J 2014 *IEEE-Trans. on ED* **61** 2983
- [23] Liu Y W 2006 *Vacuum Sci. Tech.* **26** 240 (in Chinese) [刘燕文 2006 真空科学与技术学报 **26** 240]
- [24] Electronics Industry Technology Pyrometer 1990 (Beijing: Nat. Defense Industry Press) (in Chinese) [《电子工业生成技术手册》编委会 1990 电子工业生产技术手册 (4) (北京: 国防工业出版社)]
- [25] Gren M C, Skinner H B, Tuck H A 1981 *Appl. Surf. Sci.* **8** 13
- [26] Guo W X 1984 *J. Electr. Infor. Tech.* **6** 166 (in Chinese) [郭文湘 1984 电子科学学刊 **6** 166]
- [27] Gotoh T, Hirasawa S, Kinoshita K 1982 *Thin Solid Film* **87** 385
- [28] Dudley K 1961 *Vacuum* **1** 154
- [29] Verhoeven A T and Vandoveren H 1981 *Appl. Surf. Sci.* **8** 95
- [30] Wooren L A, Ruehie A E 1955 *J. Appl. Phys.* **26** 44
- [31] Mooke G E 1950 *Phys. Rev.* **77** 246
- [32] Leverton W F, Sepherd W G 1952 *J. Appl. Phys.* **23** 787
- [33] Zhan M Q, Zhang D P, He H B 2004 *Chin. J. Lasers* **11** 1356 (in Chinese) [占美琼, 张东平, 贺洪波 2004 中国激光 **11** 1356]
- [34] Liu Y W, Zhang H L 2004 *International Vacuum Electronics Conference* 214
- [35] Cheng Y J, Li D T, Zhang D X 2010 *J. Vac. Sci. Technol.* **30** 54 (in Chinese) [成永军, 李得天, 张涤新 2010 真空科学与技术学报 **30** 54]

Study on evaporation from alloys used in microwave vacuum electron devices*

Liu Yan-Wen[†] Wang Xiao-Xia Lu Yu-Xin Tian Hong Zhu Hong
Meng Ming-Feng Zhao Li Gu Bing

(The Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

(Received 23 September 2015; revised manuscript received 22 December 2015)

Abstract

The development of modern satellite communication technologies is imposing higher demands on the lifetime and reliability of the microwave vacuum electronic devices, which directly depend on the evaporation properties of the extensively used Monel and stainless steel. Therefore, it is of vital importance to study the evaporation properties of these two types of metallic materials. For the first time, as far as we know, this paper proposes to study the evaporation properties of metallic materials using time-of-flight mass spectrometer (TOFMS). The components and the contents of the vacuum background, the evaporants from the Monel and from the stainless steel have been measured using the TOFMS, respectively. After the pressure of the measurement chamber is below 4.0×10^{-8} Pa, the TOFMS is used for the metallic materials working at different temperatures. They are respectively acquired when the Monel and stainless steel are at room temperature or operate between 750 to 900 °C under a pressure of 1.0×10^{-6} Pa. The measurements are carried out rapidly and in high sensitivity. As disclosed by the measurements, Mn and Cu began to evaporate when the Monel and the stainless steel are heated to 800 °C, which is still far below the melting points of the two alloys (1243 °C and 1080 °C). When the Monel and the stainless steel are further heated to 900 °C, the evaporation of Mn, Cu, and Cr becomes quite considerable. Once the evaporated Mn, Cu, or Cr deposit on the ceramics for the insulation in an electron gun, its insulation will be deteriorated. Hence, the Monel and the stainless steel are not suitable to be used as the components in cathode electron guns, especially those used in the devices that are to work a long lifetime in high vacuum. Moreover, the Monel and the stainless steel are not suitable for use as the components that are often under the electron bombardment, e.g., anodes and collectors, either. The SEM images and XRD of the heat treated surface structures of the Monel and the stainless steel in ultrahigh vacuum (1.0×10^{-6} Pa) have also been studied. On heating at 900 °C for 30 and 120 min the surface structure and composition change remarkably and a significant reduction in Mn and Cr is visible, and also a large number of holes and crystal boundaries emerge on the surfaces of the two metallic alloys. With increasing heating time, the boundaries will grow larger and larger. As a result, the strength of the two metallic materials becomes weaker and gas permeation and leakage even occur. Therefore, it can be concluded that the components made from Monel and stainless steel, especially those with thin walls, should not be heated to high temperatures in ultrahigh vacuum for a long time. The above phenomena are analyzed in detail theoretically and the proper and feasible application methods of the metallic materials are explored in device design and technological process control. These works are expected to contribute to the prolonging of the lifetimes of the satellites, and will lead to tremendous economic benefits.

Keywords: microwave vacuum electron devices, evaporation, TOFMS, alloy

PACS: 85.45.Bz, 82.80.Rt, 61.66.Dk, 68.37.Hk

DOI: 10.7498/aps.65.068502

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2013CB328900).

[†] Corresponding author. E-mail: liuyanwen58@sina.com