

文章编号: 1001-4322(2007)03-0477-06

# 组件与非组件式热阴极的热特性分析\*

胡太康<sup>1,2</sup>, 俞世吉<sup>1</sup>, 孟鸣凤<sup>1</sup>, 丁耀根<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 电子学研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘 要:** 利用 ANSYS 软件研究了组件式热阴极与非组件式热阴极在阴极温度分布和启动时间等特性上的异同, 并与实验结果进行对比。结果表明 组件式与非组件式结构的阴极表面温度分布都十分均匀, 组件式阴极钨筒外表面的温差与热子输入功率成正比, 组件式阴极的钨筒外温度、阴极温度高于非组件式的, 而热子温度明显低于非组件式的, 但非组件式阴极启动更快; 非组件式阴极通过增加阴极下表面发射率可以显著升高阴极温度, 增加热子发射率可以显著降低热子温度, 从而热性能也能达到与组件式阴极相近水准。

**关键词:** 组件式阴极; 热子; 发射率; 温度分布; 启动时间

中图分类号: TN12

文献标识码: A

阴极是电真空器件的核心部件, 其性能好坏直接影响器件的工作性能。各类阴极中以热阴极技术最为成熟, 应用也十分广泛。阴极的温度分布对电真空器件的工作稳定性和可靠性有很大影响, 合理的热设计对节省热子功率、延长组件寿命非常重要。

为了在提供要求的电流发射密度的同时尽可能地降低阴极工作温度, 研究人员做出了不懈的努力<sup>[1]</sup>。国外对行波管的螺旋线散热问题已经进行了多年的研究, 近几年逐渐拓展研究范围, 扩大到电子枪等部件<sup>[2-4]</sup>, 而国内微波管的热分析工作虽起步较晚, 但已经开始研究电子枪、收集极等部件的热性能<sup>[5-6]</sup>。然而对阴极热子组件的讨论侧重于热形变对电子枪发射特性的影响, 没有涉及组件内部的温度分布<sup>[5]</sup>。本文利用 ANSYS 软件对填充绝缘介质的组件式阴极和采用真空辐射传热的非组件式阴极分别进行热性能模拟, 通过定量计算来分析两种结构方式的热性能差异。

## 1 模型建立

### 1.1 建立几何模型

目前在真空电子器件中应用比较广泛的是阴极热子组件, 热子结构为双螺旋复绕形式。考虑到复绕热子的次级螺旋螺距很小, 内径与外径相比也很小, 为便于分析计算, 本文模型忽略了次级螺旋结构。

组件与非组件式阴极的模型如图 1 所示, 阴极热子组件分为四个部分: 钨丝绕制的热子, 烧结的氧化铝粉, 顶部的钨海绵阴极以及外部的钨支撑筒。非组件式阴极仅缺少氧化铝粉, 其余尺寸均与组件式阴极相同, 故只对组件式阴极的尺寸进行标注。模型尺寸为: 曲率半径  $R = 6.56 \text{ mm}$ , 阴极球直径  $D = 7.2 \text{ mm}$ , 阴极最大厚度

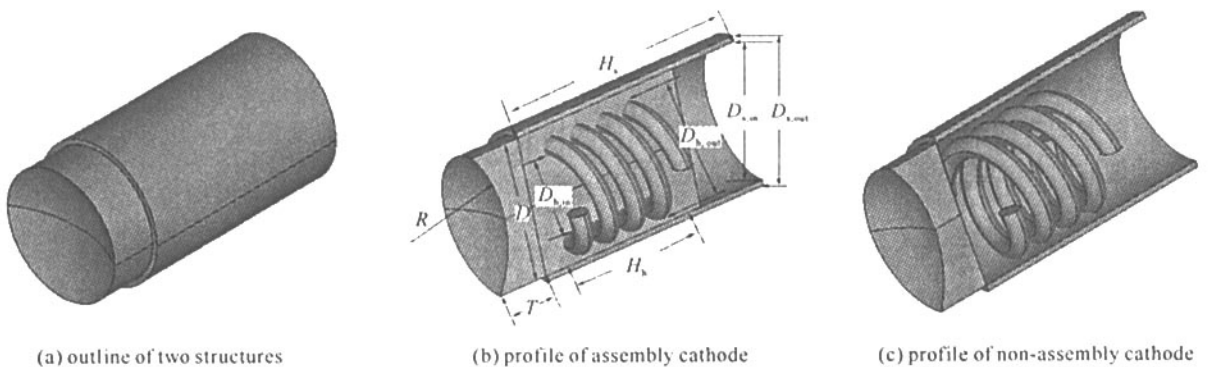


Fig. 1 ANSYS model of assembly and non-assembly cathode

图 1 组件式阴极与非组件式阴极的 ANSYS 模型

\* 收稿日期 2006-07-18; 修订日期 2007-01-07

作者简介 胡太康(1982—), 男, 硕士, 从事真空电子器件相关领域的研究; shine3935@ustc.edu.

$T = 2.6 \text{ mm}$ , 热子高度  $H_h = 7.0 \text{ mm}$ , 热子内直径  $D_{h,in} = 6.6 \text{ mm}$ , 热子外直径  $D_{h,out} = 6.0 \text{ mm}$ , 钨筒内直径  $D_{s,in} = 7.2 \text{ mm}$ , 钨筒外直径  $D_{s,out} = 7.8 \text{ mm}$ , 钨筒高  $H_s = 12.4 \text{ mm}$ 。

在研究电子枪、微波管热分布时,基于简化分析的考虑,可以使用整个阴极筒作为热源<sup>[7]</sup>。但由于阴极热子组件总体积远大于热子体积,在输入功率不变的前提下,采用均布体热源假设所得到的生热率明显低于实际生热率,从而影响计算结果的准确性。本文中建立的模型以热子作为热源。

## 1.2 边界条件的设定

阴极热子组件通常工作在真空环境,所以模型中只考虑热传导和热辐射,忽略对流效应。热传导基本方程 Fourier 定律给出了热流密度与温差的线性关系,而热辐射的基本方程 Stefan-Boltzmann 定律则描述了热流密度与绝对温度的四次方关系,引入了高度的非线性,所以控制方程很难获得解析解,为此采用数值计算。

## 1.3 接触面表面条件

真实的接触面起伏不平,实际接触面积小,接触区域也不规则,因此难以得到接触热阻的通用表达式。根据阴极的实际制造过程<sup>[8]</sup>,阴极与钨筒采用金属焊接,接触热阻很小,可以认为是理想接触,而氧化铝粉填充在钨筒中,与阴极、钨筒之间接触传热系数随着压力、温度变化而不同,范围是  $0.1 \sim 10 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ <sup>[9]</sup>。

# 2 模拟结果比较分析

## 2.1 阴极温度分布

衡量阴极工作性能的最根本的指标是发射电流密度,从 Richardson-Dushman 公式可知,发射电流密度强烈依赖于阴极发射面的温度,而且在工作温度附近电流密度对温度变化十分敏感,所以阴极发射面温度分布是热分析的重点。为了降低建模和计算的复杂度,模型中相关的材料特性参数如密度、热导率、比热容、发射率等均设定为均匀、各向同性。热子输入功率为  $20 \text{ W}$  时,组件和非组件结构的阴极温度分布计算结果如图 2 所示。

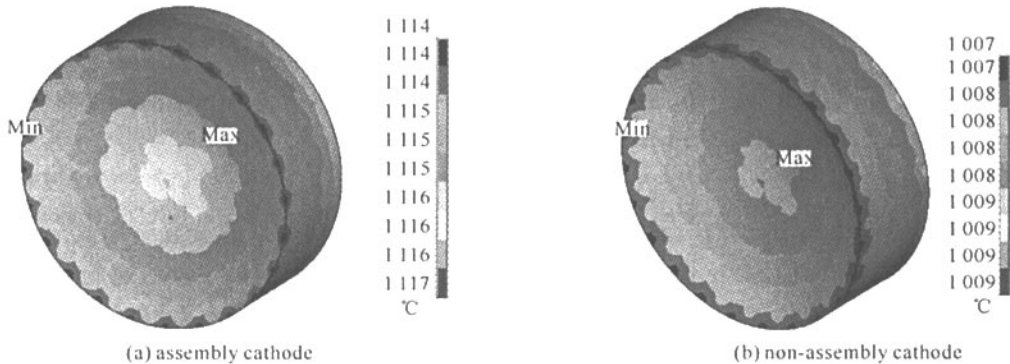


Fig. 2 Temperature distribution of cathodes

图 2 阴极温度分布

由图 2 可以看出,无论采用哪一种结构,阴极发射面温度分布都十分均匀,温差不过  $2 \sim 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,所以完全可以保证电子均匀发射。在不考虑接触面热阻的条件下,计算得到发射面温差不超过  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[10]</sup>,可见接触热阻对阴极发射面温差的影响很小。相同热子输入功率下组件式比非组件式阴极的表面温度高出  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  以上,因此阴极与热子做成组件式能节省加热功率,提高加热效率。

## 2.2 钨筒温度分布

钨筒的作用是支撑阴极且容纳热子,但钨筒温度的升高不仅造成输入功率的无效损耗,也影响支座、热屏、支撑筒等的工作稳定性。图 3 为热子输入功率为  $20 \text{ W}$  时组件与非组件式阴极的钨筒温度分布的计算结果。

对比图 2 与图 3 可以发现,钨筒温度比阴极温度高,但是相差不过数十度,符合实际经验。这也说明采用螺旋热子结构的阴极在支撑筒上消耗的功率过多,加热效率较低。

从图 3 可以看出,与组件式阴极相比,非组件式阴极的钨筒温差显著减小,这是因为组件式阴极的钨筒并未填满氧化铝粉,钨筒末端成为冷端,所以温差较大,而非组件式阴极的钨筒完全依赖热子直接辐射能量,所以末端与顶端温差不大。图 4 为组件式阴极输入功率和钨筒温差的关系曲线。由图 4 可以发现,组件式阴极的钨筒温差与热子输入功率成良好的线性关系,温差随输入功率增大而增加。

## 2.3 热子温度分布

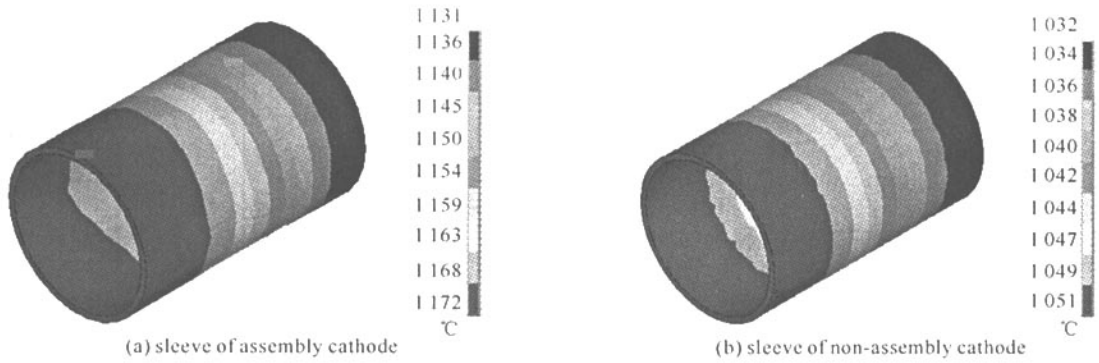


Fig. 3 Temperature distribution of molybdenum sleeves

图 3 钼筒温度分布

在阴极各个部件中,热子温度最高,工程中许多热阴极由于热子局部高温导致损坏而报废,因此在保证阴极达到工作温度的情况下降低热子工作温度有利于延长阴极寿命。

图 5 为组件与非组件式阴极的热子温度分布,由图可以看出,热子温度最高点并不在其顶端。由于热子的作用是加热阴极,因此顶端温度越高,加热效果越好,但热子的螺旋结构决定了无法在热子顶端出现最高温。组件式阴极极大降低了热子的工作温度,由图 5 可以发现,20 W 输入功率下组件式的热子温度比非组件结构降低了 400 °C 左右,然而这并不体现辐射与传导两种热传递方式之间的优劣,而是因为制成阴极、热子的钨和钼筒的钼均是热导率很高而发射率很低的材料。

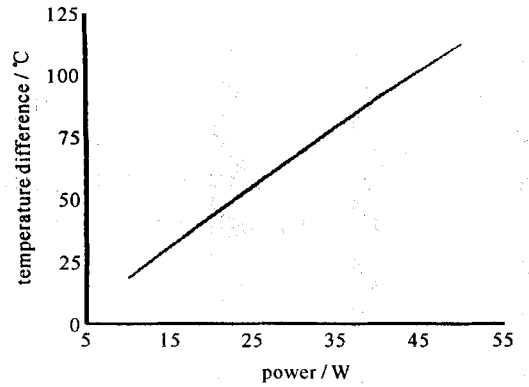


Fig. 4 Temperature difference of sleeve vs input power

图 4 输入功率与钼筒温差的关系

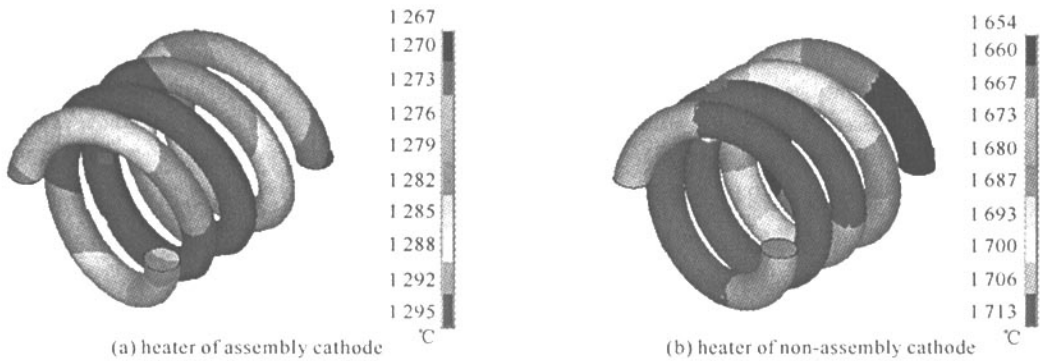


Fig. 5 Temperature distribution of heaters

图 5 热子温度分布

非组件式结构的热子温度高,而阴极温度低,其根本原因是钨与钼在工作温度下发射率太低,为了获得不同部件的发射率对阴极热特性的影响,分别计算热子、阴极下表面和钼筒内表面发射率的变化引起非组件式阴极各部件温度值的变化,得到结果如图 6 所示。为了减少计算量,发射率只取了 0.1、0.5 和 1.0 三个离散值。

在非组件式阴极中应用了黑热子技术,即提高热子的绝缘涂层的发射率,但从图 6(a)可以看出,增加热子表面发射率可以显著降低热子温度,而阴极与钼筒温度有微小下降,所以黑热子技术仅仅有利于增强热子工作的稳定性。由图 6(b)可以发现,提高阴极下表面的发射率能够显著提高阴极温度,进而加强电子发射能力,降低热子温度,延长热子的工作寿命,降低钼筒温度,减少功率浪费。所以提高阴极下表面的发射率是改善阴极热性能的十分有效的方法。由图 6(c)可知,提高钼筒内表面发射率可以降低热子温度,但是也同时降低了阴极温度,提高了钼筒温度。通过改变不同表面的发射率虽然可以明显改善非组件式阴极的工作性能,但是将图 6(a)与图 2(a)对比,将图 6(b)与图 5(a)对比,可以发现,非组件式结构的阴极温度可以达到与组件式结构相同的温度,但其热子温度仍然高出组件式结构 200 °C 以上,这是非组件式阴极目前难以克服的问题。

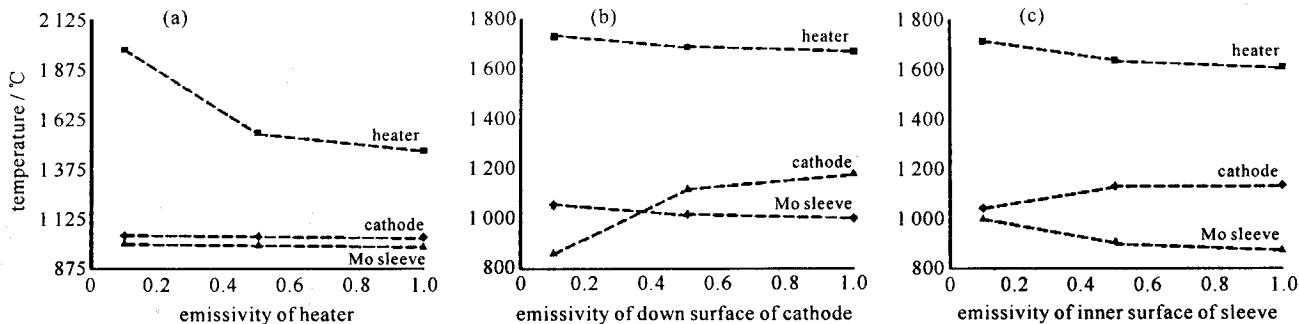


Fig. 6 Temperature of non-assembly cathode vs emissivity of heater , under surface of cathode and inner surface of sleeve

图 6 非组件式结构温度与热子、阴极下表面、钼筒内表面发射率的关系曲线

### 2.4 阴极启动时间

阴极的启动过程在实用阴极的设计中十分重要,一般阴极启动时间在 3~5 min,但是在一些要求快速启动的场合要求缩短到 3~5 s,通过提高输入功率以缩短启动时间固然是有效的方法,但是在许多情况下由于阴极需要与其它器件相互配合,所以输入功率不能随意改变。对组件与非组件式结构的阴极启动时间进行分析能够给阴极的设计工作提供一些新的思路。图 7 为组件和非组件式阴极和热子温度与各自启动时间关系曲线,阴极下表面和热子发射率均采用钨的数据。图 8 是设定阴极下表面发射率和热子发射率均为 0.5 时非组件式阴极和热子的温度与启动时间的关系曲线。

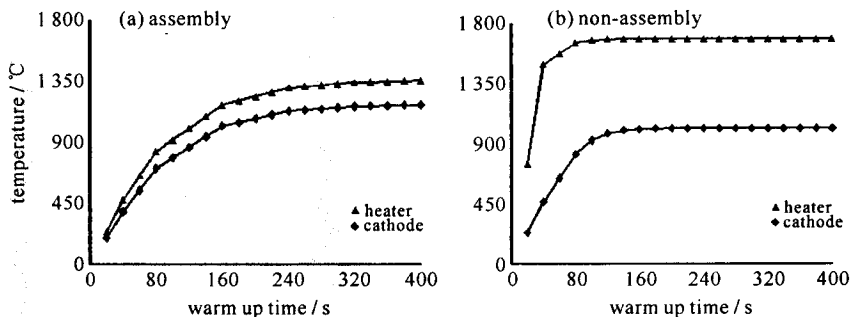


Fig. 7 Cathode and heater temperature of assembly and non-assembly cathodes vs warm up time

图 7 组件式和非组件式阴极和热子温度与启动时间的关系

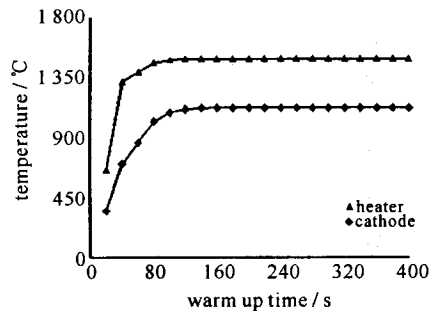


Fig. 8 Cathode and heater temperature of improved non-assembly cathode vs warm up time

图 8 改善后的非组件式结构温度与启动时间曲线

从图 7、8 可以看出,非组件式阴极采取提高阴极下表面发射率和热子发射率的改进措施后,热子温度有显著下降,但仍高于组件式阴极热子的温度,而阴极温度得到提升,与组件式阴极差别很小,改进措施对热子启动时间没有影响,图 7(a)给出组件式阴极的热子和阴极温度达到比较稳定的时间为 360 s,而图 7(b)和图 8 中非组件式阴极的热子温度稳定时间是 120 s,阴极温度稳定时间是 160 s,因此非组件式结构启动速度有明显优势,且其热子启动快于阴极,组件结构的阴极和热子启动速度基本相同。

### 3 实验测量

图 9 为实验中采用的测试设备以及简化的测试电路。阴极热子组件悬挂于抽真空的玻璃筒中,外接稳压交流电源。通过玻璃筒外部的光学高温计来测量温度,但测得的是亮度温度,必须转换为真实温度。实验中采用恒压源,通过调整电压来改变热子输入功率。对组件式阴极的热子依次施加 5, 6, 7, 8 V 电压,测得热子电流分别是 2.57, 2.83, 3.05, 3.35 A。非组件式阴极的热子加载 7, 8, 9, 10 V 电压,得到电流 2.57, 2.78, 3.05, 3.25 A。根据输入电压、电流值得出实际的热子输入功率,将这些功率值代入模型可得热子和钼筒温度,并与光学高温计测得的热子和钼筒实际温度作对比。

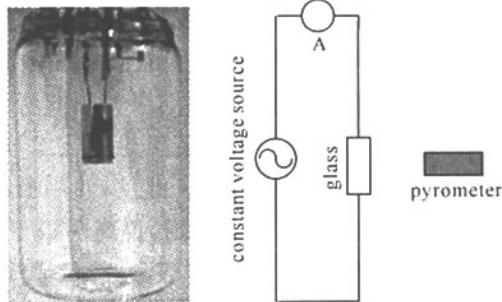


Fig. 9 Measurement setup and circuit

图 9 测试设备与电路

图 10、11 为组件式与非组件式阴极的热子和钼筒温度实验结果和计算结果,可以看出模型计算结果与实

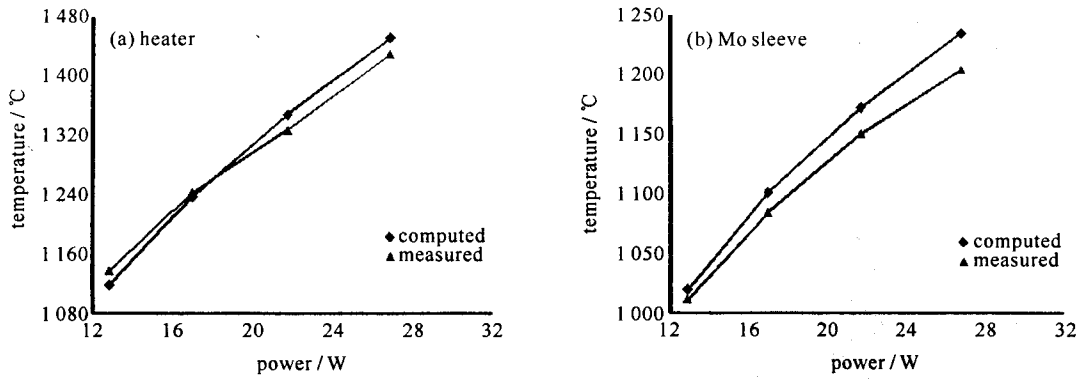


Fig. 10 Temperature of assembly cathode vs input power

图 10 组件式结构温度与输入功率的关系

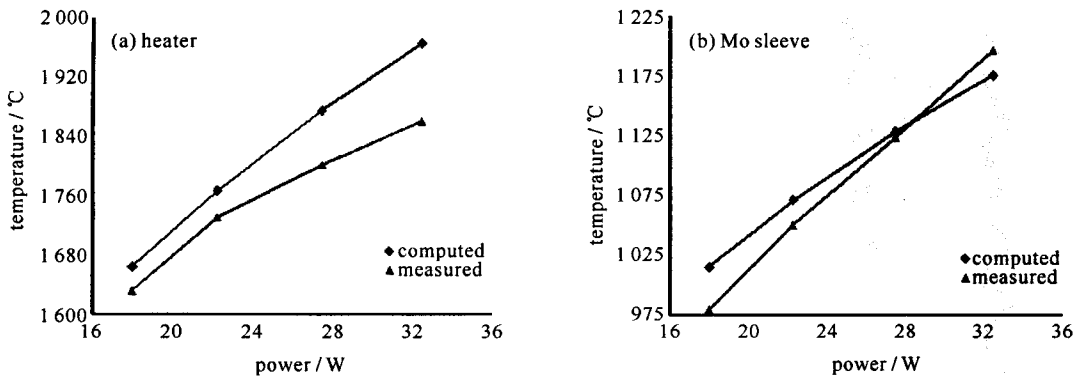


Fig. 11 Temperature of non-assembly cathode vs input power

图 11 非组件式结构温度与输入功率的关系

验结果比较一致,误差在5%以内,但是在热子输入功率较高的情况下有所增大。考虑到模型与实际器件的差别,误差产生的部分原因如下:模型中所用材料的热物理参数与实际有一定差别,模型中热子没有考虑引线长度,也忽略了热子次级螺旋结构,光学高温计测得的亮度温度转换为真实温度时有一定误差。

## 4 结论

通过建立组件式及非组件式阴极的模型,计算了组件各个部分的温度分布特性。结果显示填充氧化铝粉的组件式结构具有更优良的热特性,不仅热子温度较低,阴极发射面温度也有很大提高。但是通过在热子表面以及阴极下表面敷上高发射率涂层后,非组件式阴极可以具备与组件式阴极相近的热性能,而且启动速度也具有较大优势。然而热子和阴极温差过高的缺点很大程度上削弱了这些优势,极大限制了非组件结构的应用。

## 参考文献:

- [1] Cronin J L. Modern dispenser cathodes[J]. *IEE Proc*, 1981, **128**(1):19-32.
- [2] 刘学惠. 阴极电子学[M]. 北京: 科学出版社, 1980.(Liu X Q. Cathode electronics. Beijing: Science Press, 1980)
- [3] Sharma R K, Sinha A K, Gupta R K. Thermal analysis of electron gun for a miniature helix TWT[J]. *IETE Technical Review*, 2000, **17**(5):269-274.
- [4] Crivello R, Grow R W. Thermal analysis of PPM-focused rod-supported TWT helix structures[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1988, **35**(10):1701-1720.
- [5] Harper R, Puri M P. Heat transfer and power capabilities of EHF helix TWT[C]//International Electron Devices Meeting. 1986, **32**:498-500.
- [6] 姚列明, 肖礼, 杨中海. 行波管电子枪阴极组件的热计算[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(10):1317-1320.( Yao L M, Xiao L, Yang Z H. Thermal-stress analysis of the electron gun. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(10):1317-1320)
- [7] 姚列明, 杨中海, 李斌, 等. 行波管收集极的热分析[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(1):97-100.( Yao L M, Yang Z H, Li B, et al. Thermal analysis of TWT collector. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(1):97-100)
- [8] 赵兴群, 张国兴, 谢楷, 等. 行波管电子枪热状态模拟分析[J]. 中国工程科学, 2005, **7**(1):33-37.( Zhao X Q, Zhang G X, Xie K, et al. The analysis and simulation for the thermal condition of electron gun of TWT. *Engineering Science*, 2005, **7**(1):33-37)
- [9] Lucken J A. Some aspects of circuit power dissipation in high power CW helix traveling wave tubes, Part I: General theory[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1969, **16**(9):813-820.

- [ 10 ] 宋芳芳 ,何小琦. 行波管阴极组件热特性模拟分析[ J ]. 电子产品可靠性与环境试验 ,2005 ,12( s1 ) 68-70.( Song F F , He X Q. Thermal analysis of heater-cathode assembly of TWT. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing* ,2005 ,12( s1 ) 68-70 )

## Thermal analysis of assembly and non-assembly cathodes

HU Tai-kang<sup>1,2</sup> , YU Shi-ji<sup>1</sup> , MENG Min-feng<sup>1</sup> , DING Yao-gen<sup>1</sup>

( 1. *Institute of Electronics , Chinese Academy of Sciences , P. O. Box 2652 , Beijing 100080 , China ;*

2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100039 , China )*

**Abstract :** This paper compares the temperature distribution and warm up time between assembly cathode heated up by conduction and non-assembly cathode heated by radiation using the thermal analysis module of ANSYS. The results show that both of them have a uniform cathode surface temperature distribution and the temperature difference at the sleeve of assembly cathode is in proportion to the input power of its heater and that compared with the non-assembly cathode , the temperature of assembly cathode is higher at the sleeve and the cathode surface , but markedly lower at the heater. Nevertheless , non-assembly cathode starts faster ; moreover , improving the emissivities of the cathode 's undersurface and the heater enables the non-assembly cathode to have thermal performance similar to that of the assembly cathode.

**Key words :** Assembly cathode ; Heater ; Emissivity ; Temperature distribution ; Warm up time