

隔模带相对论磁控管的模拟研究

刘维浩, 李天明, 李家胤

(电子科技大学物理电子学院国家 863 计划强辐射研究室, 四川成都 610054)

摘要: 提出了隔模带相对论磁控管(Strapped RM)的设想并对其提高效率的机制进行了分析和粒子模拟验证. 通过对比 Strapped RM 与传统 A6 模型发现:隔模带的采用能够显著改变相互作用区的场分布以减小强高频场对注波相互作用的影响,降低阳极电流以减小阳极表面的电子注能量损耗,从而提高管子效率.粒子模拟得到 Strapped RM 的效率超过了 70%,有效克服了传统 RM 的低效率缺陷.

关键词: Strapped RM; 粒子模拟; 高效率

中图分类号: TN128 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 12-2925-04

PIC Simulation Study of Strapped Relativistic Magnetron

LIU Wei-hao, LI Tian-ming, LI Jia-yin

(National 863 High Power Radiation Laboratory, School of Physical Electronics, University of electronic science and technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: Strapped relativistic magnetron (strapped RM) was proposed and its PIC simulation study was carried out. By comparing the strapped RM with the traditional A6 model, we observe that the use of straps can significantly change the distribution of field in the interaction region and reduce the harmful effect of the intense RF field to the beam wave interaction. It can also lower the anode current and reduce the energy loss of the electron beam on the surface of the anode. All these help to increase the efficiency of RM. By PIC simulation, the efficiency of strapped RM can be more than 70%. It effectively get rid of low efficiency which is the first shortcoming of RM.

Key words: strapped RM; PIC simulation; high efficiency

1 引言

相对论磁控管(Relativistic Magnetron, RM)是一种重要的高功率微波器件,自诞生就受到各国学者的广泛关注,然而低效率一直是其公认的缺陷.除了早期有过效率高于 35% 的报道外,80 年代以后的管子效率多在 10% ~ 20% 之间^[1~4],远远低于普通磁控管 80% 的效率水平.本文介绍的隔模带相对论磁控管(Strapped RM)正是针对 RM 低效率这一重要问题提出的.分析及模拟表明,采用隔模带是提高 RM 效率的有效手段.

2 RM 的效率分析

文献[5]研究表明,在 RM 中所加的相对论电压使管子在与作用区激励起的高频场强达到甚至超过阴阳极之间的静态场强,这一强高频场使相互作用区电子的运动轨迹与在弱场的情况下相比发生质的变化,阴极发射的电子在静态场与强高频场的共同作用下,未能与高频场进行充分的能量交换就打上阳极,50% 以上的电子能量沉积在阳极表面变成热能损耗掉,导致管子效率降

低^[5].文献[6]提出了通过降低有载 Q 值,限制阳极电流,以及优选工作模式(使管子工作在 π 模)以提高 RM 效率的方法.降低有载 Q 值是通过增大高频场的输出耦合以减小强场对相互作用的影响从而提高效率.优选工作模式及限制阳极电流则分别是通过增强注波相互作用和减小阳极功率损耗以提高效率.Strapped RM 正是以上方法的应用和验证.

隔模带是链接相互间隔阳极块之间的交连环(如图 1(b)),因其具有增大模式分隔度而使管子稳定工作在 π 模的功能在普通磁控管中被广泛采用.分析表明,在 RM 中隔模带不仅起模式分隔的作用,对于管子效率也有重要的影响.

与传统 RM 相比,Strapped RM 能够有效降低管子的有载 Q 值:一方面隔模带能够增大谐振腔中 π 模场分布的均匀性,使得在输出结构相同的情况下 Strapped RM 比传统 RM 的功率输出耦合度更好;另一方面由于传统 RM 中模式分隔度小,有载 Q 值过低会进一步增大模式竞争而影响管子的稳定工作^[6].隔模带的使用增大了管子的模式分隔度,可以使其在降低有载 Q 值的同

时不致发生模式分裂而破坏管子的稳定性。

同时,隔模带对降低阳极电流也具有明显的效果。众所周知,隔模带的使用将使 π 模谐振频率显著下降。根据 RM 的门槛电压表示式^[1]:

$$V_{th} = \frac{r_a^2}{2} \left(1 - \frac{r_k^2}{r_a^2}\right) \frac{\omega_n}{n} B + \left(\frac{c^2}{2\eta} \sqrt{1 - \left(\frac{r_a \omega_n}{cn}\right)^2} - 1\right) \quad (1)$$

其中, B 为轴向磁场, η 为电子的荷质比, c 为光速, ω_n 为谐振角频率, r_k , r_a 分别为阴极半径和阳极半径, n 为谐振模式,在6腔 RM 中 π 模的 n 等于3.由此可知,在模型结构和轴向磁场确定的条件下,阳极工作电压随谐振频率降低而减小,根据空间电荷限制流原理,阳极电流将随之减小;换言之,要保持隔模带使用前后的工作电压不变,就需要增大阴阳极间的距离,这同样会导致阳极电流的减小。

综上所述,隔模带对于 π 模稳定工作,降低有载 Q 值以及限制阳极电流均有贡献,是提高 RM 效率的可行方法。

3 三维粒子模拟结果比较

本文确定的 Strapped RM 是在传统 A6 管的基础上进行了优化改进而得到的.A6 管是工作在 S 波段 RM 的典型管,它由6个大小相同的扇形腔沿角向均匀分布而成^[1].图1和表1分别给出了 A6 管及 Strapped RM 的物理模型和结构参数。

表1 模型结构参数比较

| 结构参数 模型 | 阳极 高度 | 腔体 外径 | 阳极 内径 | 阴极 半径 | 阳极 端帽 |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| A6 model | 72mm | 42mm | 21mm | 11mm | 有 |
| Strapped-RM | 30mm | 39mm | 26mm | 12mm | 无 |

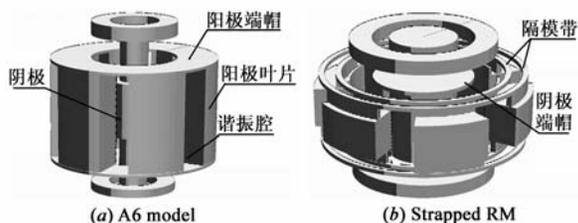


图1 物理模型

A6 管的工作参数随工作点和输出结构的变化而变化,在文献^[6]的实验中其基本工作参数为:磁场 0.5T,电压约 600kV,频率 2.8GHz,输出功率约 500MW,效率 10%.为了便于与实验结果对照,本文保持 Strapped RM 的工作电压和磁场与其一致,而在结构上做如下改进:(1)取消阳极端帽,用双端双隔模带来实现模式分隔的作用;(2)减小阳极高度以提高模式分隔度(隔模带对长阳极的模式分隔作用不明显);(3)增大阴阳极间距;(4)减小谐振腔外半径;(5)使用了阴极端帽(其作用后

面将做分析).为了防止隔模带附近的强场打火,模型增大了两个隔模带之间以及隔模带与阳极间的距离(如图 1(b)).

首先采用三维粒子模拟软件对 Strapped RM 模型和 A6 模型同时进行冷测模拟,所得结果比较如图 2 所示.其中图 2(a)为 π 模场分布;图 2(b)为谐振腔模谱图;图 2(c)为有载 Q 值随径向端口的变化。

从图 2(b)可以看到使用了隔模带之后,其产生的附加电容作用使器件谐振频率明显降低,其中 π 模(图中 $n=3$ 模)谐振频率下降最为显著,由 3.2GHz 降至 1.819GHz.同时器件模式分隔度明显增大,由 2%增至 16%,这与有关分析及实验结果是一致的。

图 2(a)表明隔模带的使用导致 π 模场分布发生明显改变.图 2(a)(iii)观察了相互作用区径向电场(随图 2(a)(ii)中的 observe line)的分布,可以看到 A6 管中的 π 模场呈现中间大两头小分布,在中间注波相互作用区域的场很强,由前文分析可知这一强场导致注波相互作用效率降低.采用隔模带之后,相互作用区的场分布变得均匀且在相同储能情况下的场强较 A6 管小,从而减小了其对应注波相互作用的影响,提高了管子效率。

图 2(c)反应了管子有载 Q 值随输出端口的增大而减小,且在径向开口角度相同的情况下 Strapped RM 的有载 Q 值较 A6 管小.这正如前文的分析:隔模带的使用增加了场分布的均匀性,提高了射频输出的耦合度。

热测模拟时,保持两个模型的工作电压及磁场一致,均采用 0.5T 轴向磁场和 545kV 的输入电压作为起振条件,均在谐振腔末端开 12° 角作为径向输出端口.模拟结果如图 3 所示.它们分别反应了两个模型振荡稳定后的电子轮辐,阳极电流,高频电场以及输出功率.可以看到,与 A6 管相比,Strapped RM 的 π 模电子轮辐更加规整,高频场的模式稳定度更好,阳极电流急剧减小(由 5.69kA 降至 88.7A),输出功率降低(由 640MW 降至 62.46MW)。

表 2 进一步给出了模拟得到两个模型功率分配情况的比较.可以看到:隔模带的采用使得阳极功率损耗由 75%骤降至 5.4%,而射频输出功率比值(即管子效率)由 9.39%提升至 72.8%.这正是 Strapped RM 相对于传统 RM 最突出的优点。

表2 功率分配对照表

| 功率分配 模型 | 注入 功率 | 射频 输出 | 阳极 损耗 | 漏出互作 用空间 | 回轰 阴极 |
|------------|----------|----------|----------|-------------|----------|
| A6 管 | 6.9GW | 0.64GW | 5.15GW | 0.84GW | 0.2GW |
| 比例 | \ | 9.3% | 74.6% | 12.2% | 2.9% |
| Strap-RM | 85.8MW | 62.46MW | 4.61MW | 16.2MW | 1.7MW |
| 比例 | \ | 72.8% | 5.4% | 18.9% | 2% |

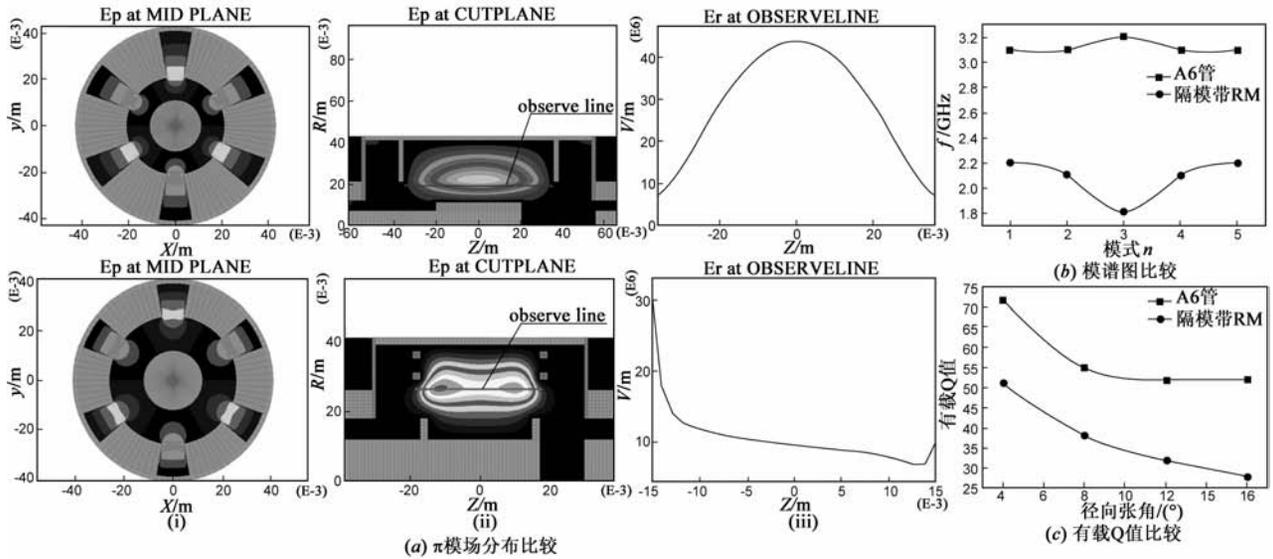


图2 冷测模拟结果比较

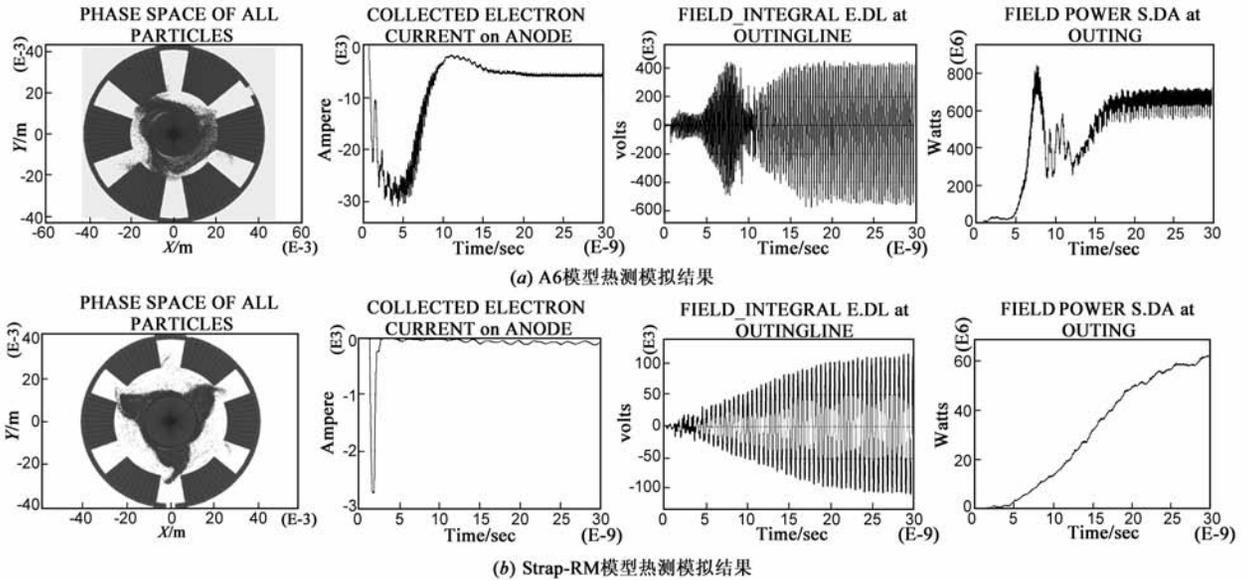


图3 热测模拟结果比较

4 模拟结果再分析

以上粒子模拟结果表明:隔模带的使用增大了管子模式分隔度,降低了有载 Q 值,减小了阳极电流,同时改变了 π 模场分布,减小了强高频场对注波互作用的影响,使 RM 效率得到显著提高.下面对模拟中发现的几个问题做进一步探讨.

(1) 射频输出功率偏低的原因分析.从模拟结果可以看出,在相同的工作电压条件下 Strapped RM 的输出功率远远低于 A6 管.其原因正如前文分析的,隔模带的使用极大降低了阳极电流,导致管子总的输入功率明显下降(由几个吉瓦降至几十兆瓦),所以尽管管子的能量转换效率很高但射频输出功率却相对较低.

然而低输出功率并不是不可以克服的困难,只要进一步提高管子的工作电压及与之匹配的轴向磁场,

即提高相对输入功率,Strapped RM 仍然可以达到几百兆瓦的功率输出.

图 4 给出了模拟得到不同工作电压和磁场条件下 Strapped RM 的输出功率和效率.可以看到随着工作电压和轴向磁场的提高,射频输出功率呈线性增加,而管子效率保持在 70% 左右,并没有像传统 RM 中出现的当输出功率达到几百兆瓦时效率明显下降的现象.这是由于高频场对电子运动的影响是看其对静态场的相对值而不是绝对值.在 Strapped RM 中,当射频输出功率达到几百兆瓦时,输入电压将达到一兆伏以上,高频场强相对于阴阳极间的静态场强仍然是一个小量,不会像传统 RM 那样对腔内注波互作用产生显著影响而导致管子效率明显降低.

(2) 阴极端帽的作用分析.在传统 RM 中为了防止

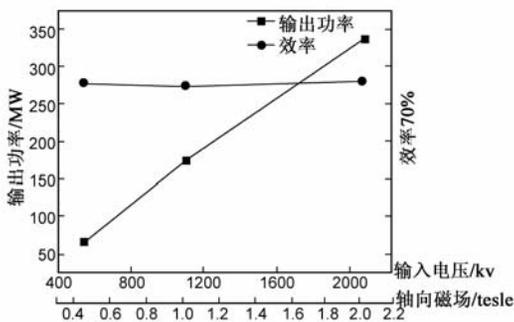
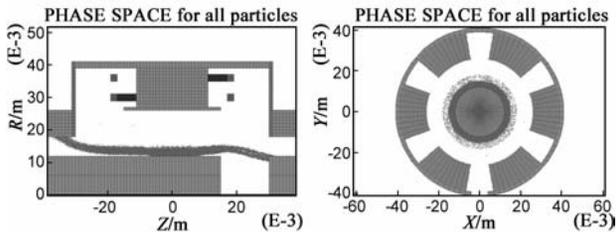


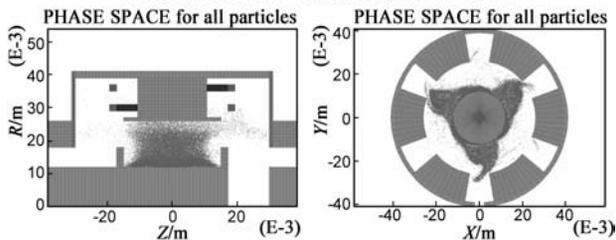
图4 输出功率及效率随电压和磁场的变化

由阴极端帽产生的电子发射扰乱电子注与高频场的相互作用,设计时几乎不使用阴极端帽.本文通过模拟发现,在 Strapped RM 中,如果不使用阴极端帽,电子根本打不上阳极(如图 5 所示),输出功率也大幅减小.这是由于 Strapped RM 增大了阴阳极间的距离,使得附着在阴极表面的电子注最外层电子不能到达阳极表面(π 模在阳极谐振腔附近的场最强^[1])与高频场进行有效相互作用,导致管子不能起振.电子注在空间电荷力作用下往两侧发散形成图 5(a)所示的空间相位分布.阴极端帽的作用在于:一方面阻止电子的轴向漂移,增加了电子注层的厚度;同时一定程度上改变阴阳极间的场分布而使相互作用区的场增强,这相当于增大了阴极半径而减小阴阳极间距.它们都使得相互作用区电子注的相对厚度增大,最外层电子能够达到阳极表面与 π 模场进行有效相互作用而使管子起振.



(a) 无阴极端帽时的电子注相空间分布

(左图为纵剖面分布,右图为横截面分布(下同))



(b) 有阴极端帽的电子注相空间分布

图5 阴极端帽的影响

5 结论

本文对隔模带提高 RM 效率的机制进行了分析与粒子模拟.结果表明:隔模带的采用能够显著改变交互

用区的场分布,减小强高频场对注波互作用的影响,降低阳极电流,减小阳极表面的电子注能量损耗,提高管子整体效率.粒子模拟得到 Strapped RM 的效率超过 70%,极大提高了 RM 的效率水平,验证了文献[6]对于提高 RM 效率措施的设想.文章同时对模拟中发现问题进行了分析.

参考文献:

- [1] A Palevsky, G Bekefi. Microwave emission from pulsed, relativistic e-beam diodes II: the multiresonator magnetron[J]. Phys Fluids, 1979, 22(5): 986 - 996.
- [2] S T SPANG, et al. Relativistic magnetron development for use in a lightweight, repetitively pulsed, portable HPM transmitter [J]. IEEE Trans on Plasma Science, 1990, 18(3): 586 - 593.
- [3] Steve Ashby, et al. High peak and average power with an L-band relativistic magnetron on CLIA[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 1992, 20(3): 344 - 350.
- [4] Robert J Barker, Edl Schamiloglu. 高功率微波源与技术 [M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
Robert J Barker, Edl Schamiloglu. High Power Microwave Source and Technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [5] 李天明, 李家胤, 等. 影响相对论磁控管效率的因素分析 [J]. 电子学报, 2006, 34(9): 1721 - 1725.
Li Tian-ming, Li Jia-yin, et al. Analysis of factors affecting relativistic magnetron's efficiency [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(9): 1721 - 1725. (in Chinese)
- [6] 李天明. 相对论磁控管的理论与实验研究 [D]. 成都:电子科技大学, 2005.
Li Tian-ming. Theoretical and Experimental Research of Relativistic Magnetron [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2005. (in Chinese)

作者简介:

刘维浩 男, 1984 年出生于湖南. 电子科技大学物理电子学专业在读博士生, 主要从事太赫兹科学技术以及高功率微波源的研究.
E-mail: liuwahao@foxmail.com

李家胤 男, 1944 年生于四川绵阳. 1967 年毕业于成都电讯工程学院电真空器件与制造专业, 1981 年成都电讯工程学院微波电子学硕士毕业, 1985 ~ 1986 年在前苏联列宁格勒电讯学院学习电子与量子器件. 多年来从事高功率微波及其在国防上的应用研究, 主持多项高功率微波研究工作, 获得了省部级奖多项, 是我国最早开展高功率微波器件实验研究的学者之一.

E-mail: jyli@uestc.edu.cn