

强耦合式带状注速调管多间隙输出腔的设计

梁源^{1,2}, 赵鼎¹, 王勇¹, 阮存军¹, 丁耀根¹, 阮望¹

(1. 中国科学院电子学研究所 中国科学院高功率微波源与技术重点实验室,北京 100190;

2. 中国科学院研究生院,北京 100039)

摘要:提出了一种强耦合式带状注速调管多间隙输出腔,并将之应用于 Ka 波段带状注速调管输出腔的设计. 此设计可以获得更好的输出耦合特性和理想的场形. 更重要的是,这种结构的漂移管允许被设计为对工作频率的截止状态,从而可以获得更理想的电场场形以利于注波互作用. 从表面电流的角度分析了这种设计的理论依据. 通过使用粒子模拟软件进行仿真,在中心频率获得了稳定的功率输出,互作用效率达到 50% 以上,3dB 带宽约 75MHz.

关键词:带状注;强耦合;多间隙输出腔

中图分类号:TN122 文献标识码:A

Design of multi-gap output cavity of strong coupling sheet-beam klystron

LIANG Yuan^{1,2}, ZHAO Ding¹, WANG Yong¹, RUAN Cun-Jun¹, DING Yao-Gen¹, RUAN Wang

(1. Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies,

Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

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

Abstract: A new strong coupling multi-gap output structure has been developed as the output cavity of Ka band sheet beam klystrons. This structure has a better output coupling characteristics and better shape of electric field. Moreover, when the drift tube of the output cavity is cut-off in the operating frequency, an ideal field shape can be obtained as to support more efficient beam-wave interaction. An analysis of the distribution of the surface current supports the design theoretically. A stable output power curve can be observed at the center frequency by using particle-in-cell simulations, where the interaction efficiency is more than 50% and the 3dB bandwidth is about 75MHz.

Key words: sheet-beam; strong coupling; multi-gap output cavity

PACS: 07.50.-e

引言

伴随着速调管不断向高频率(毫米波、亚毫米波、甚至太赫兹频段)、高功率、宽频带、小型化和紧凑型等方向的发展,以及伴随着计算机和三维电磁仿真软件水平的不断提高,带状注速调管重新获得了人们的关注^[1,2],开始了新型带状注真空电子器件的研制工作,并已成为前沿领域技术发展与应用的重要研究方向^[3]. 这种新型器件采用了宽高比值很大的薄矩形截面电子束,突破了空间电荷力对

强流束的限制,可使其工作于毫米波甚至太赫兹频段,并获得很高峰值功率和平均功率. 由于这些技术潜力与优势,20 世纪 90 年代以来,国际上多家机构对其进行了较深入的研究,并取得了一些进展^[4-6].

在带状注速调管中,电子注的调制、群聚以及能量交换的基本过程与传统速调管相同^[7]. 为与薄矩形电子注的特殊形状相配合,需要采用非圆对称的矩形谐振腔^[8]. 谐振腔的性能直接影响速调管的效率、输出功率、增益和带宽等诸多特性^[9]. 对于带状注速调管,其输出电路的设计多采用多间隙扩展互

收稿日期:2012-06-09,修回日期:2012-08-11

基金项目:国家自然科学基金(61222110,60971073,61172015)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(61222110,60971073,61172015)

作者简介(Biography): 梁源(1979-),男,山西临汾人,助理研究员,硕士,主要研究领域:物理电子学、真空电子学. E-mail:lynx_7233@yahoo.com.cn

Received date: 2012-06-09, revised date: 2012-08-11

作用腔输出结构来增加功率容量以及展宽带宽. 对于一个由 N 个间隙构成的多间隙耦合腔, 一方面谐振腔的面积变为单腔面积的 N 倍, 使得腔内单位面积内的损耗下降为原来的 $1/N^2$ ^[7]; 另一方面多间隙耦合腔相当于一个串联电路, 每个腔的间隙电压变为原来的 $1/N$, 这也大大减少了高频击穿的可能性, 有利于峰值功率的提高^[10].

1 强耦合带状注多间隙输出腔的模型

图 1-a 所示为一种传统的带状注多间隙输出腔, 该谐振腔是由多个哑铃型结构通过漂移管耦合组成的多间隙腔体 (本文之后称之为分离式输出腔), 通过该结构可以获得较为理想的间隙电场分布. 但由于这种多间隙腔体漂移管两侧谐振腔完全分离, 若采用如图 1 所示的输出波导及其耦合结构, 则输出波导只和与其结构相连的谐振腔有较强的耦合, 而与不连接的谐振腔耦合较弱, 这样势必造成外观品质因数过高, 能量输出困难.

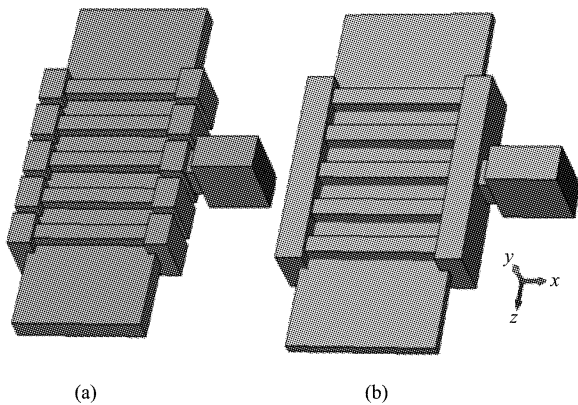


图 1 (a) 分离式多间隙输出腔结构图 (b) 强耦合式多间隙输出腔结构图
Fig. 1 (a) Structure of separating output cavity (b) Structure of strong coupling output cavity

本文提出图 1(b) 所示的强耦合式输出腔结构, 该结构与分离式输出腔的区别是将漂移管两侧的谐振腔合并连通为一个谐振腔. 但可以这样连通的前提条件是腔体工作模式为模或模, 本文所研究的输出腔正是模的工作模式.

2 从腔体表面电流出发对两种多间隙输出腔的对比分析

2.1 分离式多间隙谐振腔的表面电流分析

对于不加载波导的五间隙分离式多间隙腔, 图 2 给出了利用 CST-微波工作室计算得到的表面电流

图, 其五个间隙处以及漂移管两侧谐振腔的表面电流流向相同, 谐振模式为 2π 模. 在两个谐振腔之间取平面“A-A” (该平面并不真实存在), 该面垂直于漂移管方向, 分别顺着箭头方向和逆着箭头方向看去, 可得到与“ A-A ”面相邻的两侧腔壁的表面电流流向图. 图 3 (a) 为顺着箭头方向 (平面左侧) 看到的电流图, 图 3 (b) 为逆着箭头方向 (平面右侧) 看到的电流图, “ A-A ”面两侧的电流向相反. 取漂移管单侧的腔壁电流分析, 得到漂移管单侧谐振腔的表面电流流向图, 如图 4 所示. 此输出腔中, 各腔电流主要是通过漂移管实现的耦合.

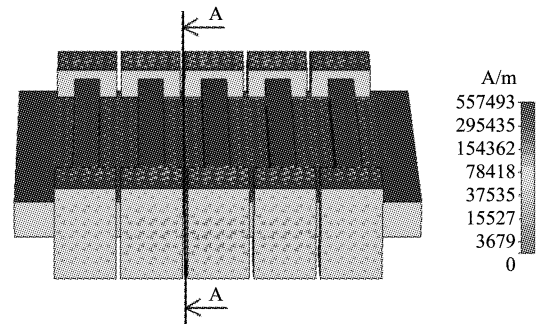


图 2 分离式多间隙腔的表面电流图
Fig. 2 Surface current of separating multi-gap cavity

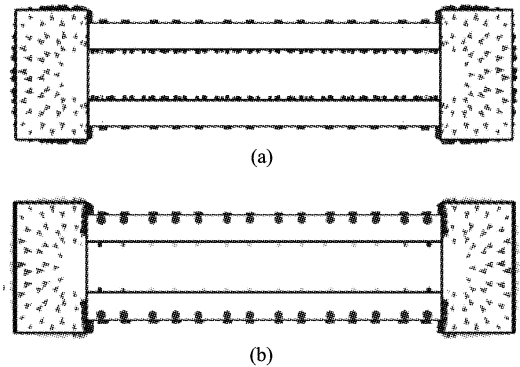


图 3 (a) 平面“ A-A ”左侧腔壁的表面电流图 (b) 平面“ A-A ”右侧腔壁的表面电流图
Fig. 3 (a) Surface current on left side of “ A-A ” plane (b) Surface current on right side of “ A-A ” plane

2.2 强耦合式多间隙谐振腔的表面电流分析

类似于 2.1 节的分析方法, 图 5 给出了强耦合式多间隙腔电流示意图, 图 5(a) 是强耦合式多间隙腔单侧谐振腔实际的表面电流, 图 5(b) 是相同电流情况的另一种表达形式. 在漂移管每个相邻的间隙中间取与漂移管方向垂直的隔离平面 (该隔离平面并不真实存在), 如图中的平面“ B-B ”, 五间隙腔共

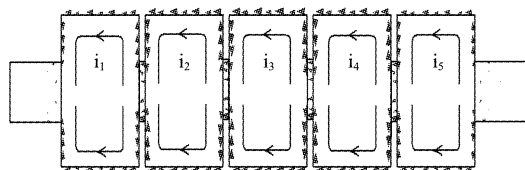


图4 分离式多间隙腔漂移管单侧的谐振腔表面电流
Fig.4 Surface current of cavity on one side of drift tube

有四个这样的隔离平面. 由于在这些平面上并无电流通过, 所以不妨理解为平面两侧都存在大小相等方向相反的电流, 叠加后的电流值为零, 即图 5(b). 图 5(b) 更能从本质上描述此表面电流, 它将强耦合式多间隙腔单侧谐振腔的表面电流还原为五个分离谐振腔的表面电流.

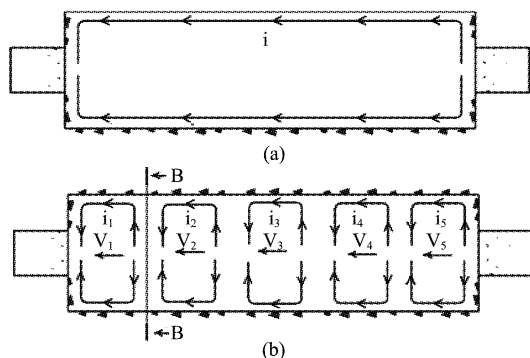


图5 (a)强耦合式多间隙腔实际的谐振腔表面电流
(b)强耦合式多间隙腔等效的谐振腔表面电流
Fig.5 (a) Actual surface current of cavity on one side
(b)Equivalent surface current of cavity on one side

从图 5(b) 的电流示意图分析. 首先, 由交变电流 i_i 建立了交变电压 V_i , 电流和电压可分别等效为电感和电容. 平面“B-B”的两侧 i_1 与 i_2 方向相反, 大小相等; 这些假想隔离面可以理解为宽的耦合缝, 不同的是这些“耦合缝”很大, 以至于完全连通了各相邻腔. 由于电流在各隔离平面上方向相反, 大小相等, “耦合缝”基本不影响腔内场和电流的分布^[9]. CST 仿真也显示扩大或缩小“耦合缝”, 场与电流几乎不受影响. 而耦合缝扩大到完全连通相邻各谐振腔时, 从腔体结构看, 分离式多间隙腔已随着“耦合缝的变大”过渡到了强耦合式多间隙腔. 定性分析, 当工作频率在多间隙腔的 2π 模式时, 可认为分隔面两侧的电流流向相反、大小相等; 而工作频率偏离谐振频率时, 由于腔内场不再严格按照 2π 模式振荡, 因此无法保证电流流向相反、大小相等, 并且由于分隔面两侧电流无法完全抵消, 分隔面边缘会有

电荷积累并产生电场变化, 这样会有不依赖于腔壁的位移电流产生.

强耦合式多间隙腔同侧各谐振腔之间的耦合共有两部分, 分别是由相邻腔连通而产生的耦合与相邻腔通过漂移管建立的耦合. 此时将整体的腔体看作各个相邻腔被完全连通后的效果, 即从概念上将之看作是分离的各腔(耦合口开的很大以至于完全连通各腔); 从结构上看, 在漂移管两侧还是整体的谐振腔. 对分离式多间隙腔则不同, 由于相邻腔之间被腔壁隔离, 因此没有腔与腔间的耦合, 只有通过漂移管建立起来的耦合. 然而漂移管建立的耦合对距离非常敏感, 尤其是漂移管对工作模式截止时, 只有在相邻腔距离很近时才有一定的耦合. 软件模拟和冷测显示, 漂移管在截止状态下, 电场可向间隙两侧的漂移管中渗透一段距离, 从而有可能在足够近相邻腔之间建立耦合.

3 高频与注波互作用仿真的研究

3.1 强耦合式多间隙输出腔的高频仿真分析

图 6 是强耦合式多间隙谐振腔在不加载波导时漂移管沿中间平面处的纵向电场分量图, R/Q 为 241.2Ω , 场形左右对称, 中间腔的场最强, 两边依次减小. 由于漂移管对工作模式截止, 在相邻间隙之间, 纵向电场强度基本为零.

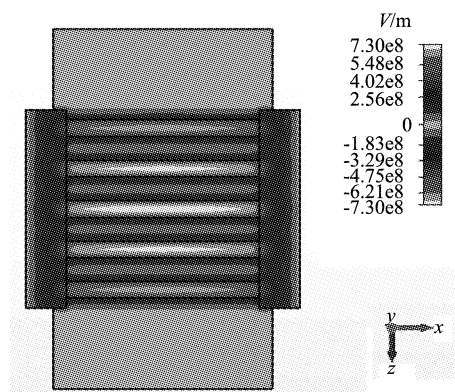


图6 无波导加载多间隙腔的纵向电场云图
Fig.6 Cloudy picture of E_z -field of cavity

强耦合式多间隙输出腔还有一个优势: 它允许漂移管被设计为对工作频率的截止模式, 还能保证一定的带宽. 漂移管厚度对间隙之间的耦合有很大影响, 漂移管越“薄”, 对工作模式的耦合越弱. 当漂移管对工作模式截止时, 分离式多间隙输出腔间隙之间将无法建立足够的耦合, 从而导致与波导不直接相连的谐振腔几乎无法输出能量; 但对于强耦合

式多间隙输出腔则无此顾虑,因为它可以完全依靠两侧谐振腔的连通而建立起耦合.

将漂移管设计为对工作模式截止的好处可通过图 7 以及文后的粒子模拟体现出来. 图 7 为漂移管的高度比分别取 2.15 mm 和 1.1 mm 时(两种漂移管的宽边尺寸一致),漂移管中沿纵向方向(电子注方向)的中线处的电场纵向分量图,两幅图中的电场值分别被各自图中的最大值归一化. 两幅图的每个电场峰值的位置分别对应各个间隙的中线. 图 7 (a)中相邻两峰值之间仍有很强的电场,这样的场形不利于注波相互作用. 图 7(b)显示随着漂移管“变薄”,两间隙之间的电场趋于零,漂移管基本抑制了电场的耦合.

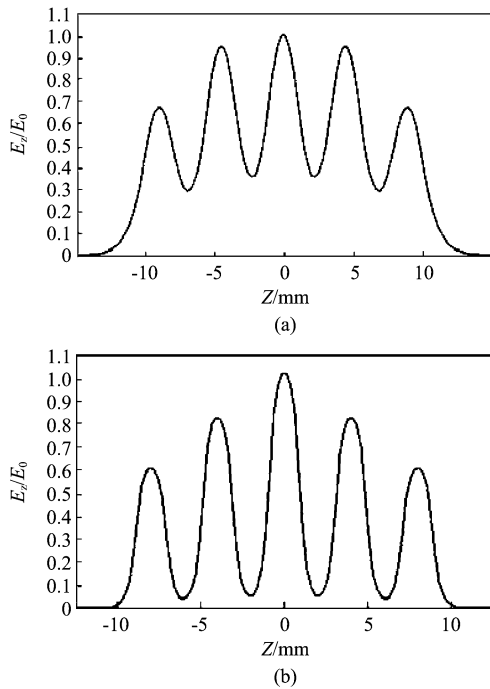


图 7 (a) 漂移管高度为 2.15 mm 时的电场纵向分量图
(b) 漂移管高度为 1.1 mm 时的电场纵向分量图
Fig. 7 (a) E_z -field of drift tube with tube's height of 2.15 mm (b) E_z -field of drift tube with tube's height of 1.1 mm

输出腔的外观品质因数 Q_{ext} 是输出腔的重要参数,对速调管的效率和带宽有重要影响. 图 8 是两种输出腔结构的群延时对比图. 两种输出腔工作在 Ka 波段,耦合口尺寸与波导尺寸完全相同. 可见在频率相同、工作模式相同和腔体尺寸相差不大的情况下,群延时的值相差近十倍.

根据文献[9]中外观品质因数的计算式,外观品质因数与群延时直接相关,如式(1):

$$Q_{\text{ext}} = \frac{\omega_0 \tau_g}{4}, \quad (1)$$

式中: Q_{ext} 是外观品质因数, τ_g 是群延时, ω_0 是腔体固有角频率. 因此强耦合式多间隙输出腔可显著降低 Q_{ext} , 增加带宽.

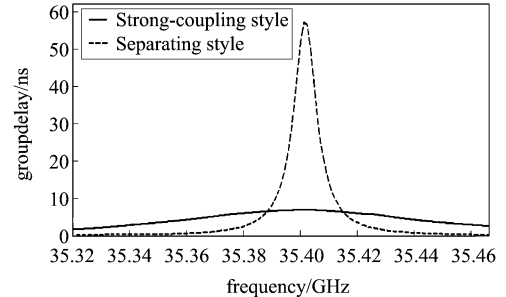


图 8 两种多间隙输出腔结构的群延时对比
Fig. 8 Comparison of group delay of output cavities

对谐振腔与波导耦合的情况, Q_{ext} 的大小取决于耦合口的大小^[9]. 图 1(a) 的结构中,分离式多间隙输出腔 Q_{ext} 很高是由于各腔之间是弱耦合;除了直接与波导连接的谐振腔,其他腔与波导的耦合很小. 如果腔体与外电路耦合不够,直接的方法是扩大耦合口. 但对于分离式多间隙腔,由于单腔尺寸的限制,耦合口无法取很大;而且即使可将耦合口取很大,也只能增加与波导直接相连的谐振腔的耦合. 所以要降外观品质因数,分离式腔只能通过锥形口与其他腔建立连接.

需要补充几点:第一,强耦合式多间隙腔之所以只适用于或的模式,是因为在模工作时,分界面两侧电流同向,叠加值接近于单侧电流的两倍,取消金属分界面将截断大部分表面电流,虽然位移电流不依赖于金属壁,但还会很大的影响腔内场分布. 第二,本节对比两种腔的 Q_{ext} 时,取的是漂移管对工作模式不截止的情况,若漂移管对工作模式截止或接近截止时,计算出的分离式多间隙输出腔的 Q_{ext} 会比强耦合式输出腔的更低,但这并不意味着能耦合出更多能量,而是因为漂移管对工作模式的截止,输出波导其实只和与其直接相连的腔体有耦合,此时波导端口只能激励中间腔,其他谐振腔几乎不工作,因此 Q_{ext} 反而更低. 第三,当分离式多间隙腔各腔距离很近时,也可以在漂移管较薄时建立工作模式,这是由于相临两腔电场通过漂移管的渗透作用而建立的弱耦合,但为了获得较低的 Q_{ext} ,依然需要锥形波导.

3.2 强耦合式多间隙输出腔注波相互作用的仿真

本文用三维粒子模拟软件对高频场与电子注能量的转化进行模拟仿真. 速调管的工作电压取 120

kV,工作电流 10 A,工作中心频率 35.38 GHz,轴外加 6 000 高斯的均匀磁场,漂移管和电子注的宽高比都取 20: 1,模拟采用预群聚电子注(基波电流的调制深度为 1)。

电子注的群聚可通过图 9 显示,由于电子注通过输出腔时与间隙电场的相互作用,群聚被明显的加强(图 9 是在漂移管宽边的中间位置所取的 Y-Z 截面,看不到强耦合部分的结构)。图 10 是在电子注的激发下,沿漂移管中间平面的电场纵向分量云图,可见电场峰值都在间隙中线处,而间隙之间电场值接近零,这是好的注波相互作用需要的条件。

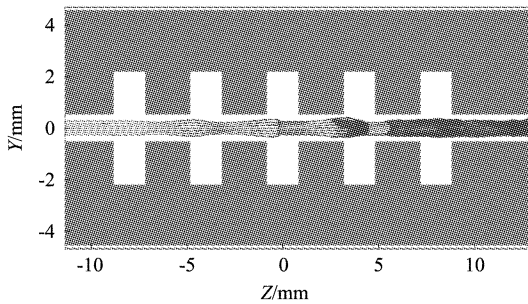


图 9 电子注相空间图
Fig.9 Phase - space profile of electron beam

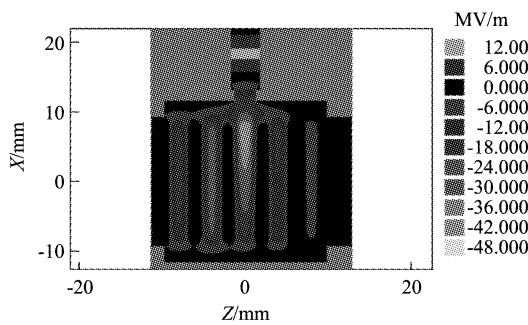


图 10 群聚电子注激发的纵向电场云图
Fig.10 Cloudy picture of E_z - field excited by electron beam

图 11 显示大多数电子有大幅减速,部分电子甚至从 120 keV 减到 20 keV 左右,说明电子注通过输出腔时有剧烈的能量交换。图 12 是中心频率处输出功率与时间的关系图,在 30 ns 功率趋于稳定,保持在 603 kW 至 607 kW 之间,效率稳定在 50% 以上。

图 13 显示该输出腔拥有单一的谱线,在工作频率,电子注没有激励起其他模式。优化设计后,输出腔的带宽特性如图 14 所示,其 3 dB 带宽约 75 MHz,频带内最大效率达到 50.8%。

在参数基本不变的情况下,本文同样对分离式

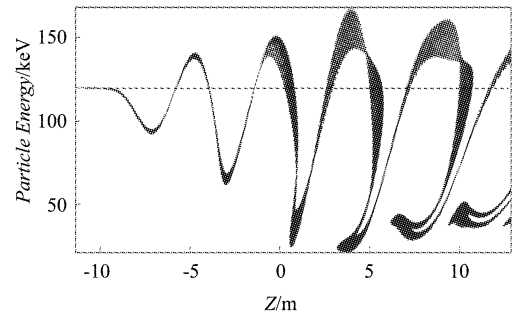


图 11 电子注的能量变化图
Fig.11 Energy change of electron beam

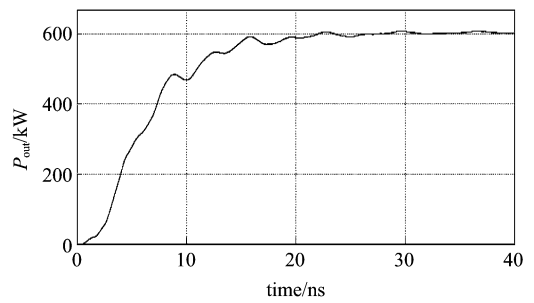


图 12 波导输出功率的瞬时值
Fig.12 Power from the waveguide vs. time

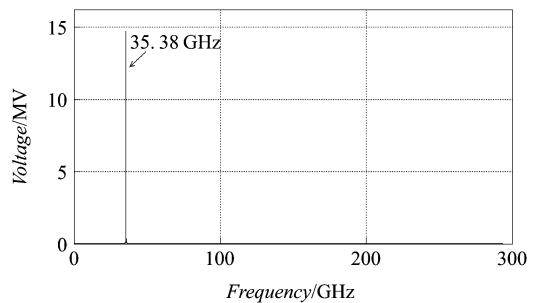


图 13 输出腔的频谱图
Fig.13 Frequency spectrum of output cavity

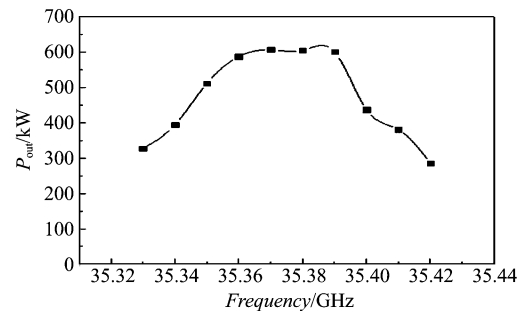


图 14 输出腔的功率-频率关系图
Fig.14 Output power vs. frequency

多间隙输出腔进行了模拟。由于分离式输出腔无法

采用对工作模式截止的漂移管,本文对漂移管高度为 1.7 mm(宽边尺寸为 21.5 mm)的情况进行了优化,虽然拥有不低于强耦合式多间隙腔的 R/Q,最终只获得了 410 kW 的功率输出,即 34% 的效率.

3.3 主要结构参数对输出腔特性的影响

在输出腔的设计中,各参数对谐振腔的高频和注波相互作用特性都有影响.相比于其他的结构参数,其中漂移管的高度和间隙之间的距离对输出腔的功率输出影响更大.表 1 显示了漂移管高度(漂移管宽度不变,为 21.5 mm)对输出腔特性的影响,可见,随着漂移管变薄,效率明显提高.

表 1 漂移管高度与输出腔特性的关系

Table 1 Relation between height of drift-tube and performance of output cavity

Height of drift-tube(mm)	Frequency(GHz)	R/Q(Ω)	Efficiency(100%)
2.15	34.11	243.2	26.0
1.43	34.93	242.6	38.2
1.1	35.42	241.2	50.3

表 2 是间隙距离 d_{gap} 对输出腔的影响,此处的间隙距离是相邻间隙之间的距离.该多间隙输出腔是 2π 的工作模式,考虑到电子注在输出腔的剧烈减速, $\beta_e g d_{\text{gap}}$ 在至之间取值.

表 2 间隙距离与输出腔特性的关系

Table 2 Relation between distance of gaps and performance of output cavity

Distance of gaps(mm)	Frequency(GHz)	R/Q(Ω)	Efficiency(100%)
3.7	35.71	244.1	48.1
4.0	35.42	241.2	50.3
4.3	35.24	236.9	47.2

两组对比数据中,保持电流为 10 A 不变的情况下,电子注的宽高比同漂移管的宽高比做同比例的调整;每组的效率都是对加速电压做微小调整后的优化结果,调整电压是因为谐振频率不同.经过优化,最终选定参数为:漂移管高度为 1.07 mm,宽高比为 20:1,间隙距离为 4.06 mm.虽然漂移管进一步变薄还能获得更大的功率,但需要更大的聚焦磁场和压缩比更高的电子注配合.

4 结论

对比分析了强耦合式多间隙输出腔和分离式多间隙输出腔的主要特性.总结出在降低外观品质因数、获得理想的场形等方面,强耦合式多间隙输出腔有明显优势.还阐述了强耦合多间隙输出腔的理论依据,以及两种腔之间的关系以及它们本质上的一致性.最后利用三维 PIC 软件进行了模拟,并获得了理想的效率和带宽,证明了这种结构的可行性.因此,本文为带状注速调管输出腔的设计提供了一种有效的方案.

REFERENCES

- [1] Eppley K R, Herrmannsfeldt W B, Miller R H. Design of a wiggler-focused, sheet beam klystron [C] // Proc of the 1987-Particle Accelerator Conference, Washington DC, 1987; 1809-1811.
- [2] RUAN Cun-Jun, Wang Yong. Development of high-power sheet beam klystron [J]. *High Power Microwave Technology* (阮存军,王勇.带状电子注高功率速调管的发展评述. *高功率微波技术*), 2005, 13(2):32-41.
- [3] RUAN Cun-Jun, WANG Shu-Zhong, ZHAO Ding, et al. The Development of Millimeter Wave Sheet Beam Devices [J]. *VACUUM ELECTRONICS* (阮存军,王树忠,赵鼎等.新型带状注毫米波器件的研究进展. *真空电子技术*), 2010,02:8.
- [4] Solyga S, Henke H. Two-Dimensional Design of a Low Voltage mm-Wave Sheet Beam Klystron [C]. Proc. of the 8th ITG-Conference on Displays and Vacuum Electronics, 1998, Garmisch Partenkirchen, 1998;275-279.
- [5] Michael Read, Lawrence Lves, Purobi Phuiups. SBK final report [R]. DE-FG02-03ER83617, 2004.
- [6] Scheitrum G. Design and Construction of a W-band Sheet Beam Klystron [R]. SLAC-PUB-11688, 2005.
- [7] Editorial Board of Vacuum Tube. *Design Manual High-power klystron design manual* [M]. Beijing: National Defense Industry Press (电子管设计手册编辑委员会. *大功率速调管设计手册*. 北京:国防工业出版社), 1979.
- [8] David Yu, Perry, Wilson. Sheet-Beam Klystron RF Cavity [C]. IEEE 1993 Particle Accelerator Conference, pp. 2681-2683.
- [9] DING Yao-Gen. *Theory and Computer Simulation of High Power Klystron* [M]. Beijing: National Defense Industry Press (丁耀根. *大功率速调管的理论与计算模拟*. 北京:国防工业出版社), 2008.
- [10] Garyotakis G. NLC Klystron R&D [R]. SLAC's 2001 Research Report.