

迴旋谐振脉塞振荡器*

廖正久

(中国科学院电子学研究所)

提 要

本文对几种不同类型的迴旋谐振脉塞振荡器的电动力学系统、工作原理、性能进行了分析比较。表明：外激励迴旋谐振脉塞双腔同步振荡器和具有外反馈的迴旋谐振脉塞双腔振荡器是比较理想的大功率毫米波和亚毫米波振荡器。

一、前 言

大家都知道，“O”型超高频器件的种类很多，而每一种“O”型超高频器件都有一种或一类迴旋谐振脉塞器件与之对应^[1]，所以迴旋谐振脉塞振荡器和放大器也是各式各样的。目前迴旋谐振脉塞振荡器已是一种较成熟的器件，美苏，特别是苏联对迴旋谐振脉塞振荡器进行了深入的理论^[2-4]和实验^[5-8]研究。而迴旋谐振脉塞振荡器又分为两大类^[9]：一类是多模工作的，另一类是单模单频工作的。前者适用于对频谱要求不高，只要求提供大功率的场合，后者则是人们研究的主要对象。

早期的迴旋谐振脉塞振荡器是一种单腔振荡器，它是一种大功率的毫米波器件。它采用横向尺寸远大于波长的、大功率容量的电动力学系统，即一般采用变截面或不变截面的开放式谐振腔和变截面的开放式同轴谐振腔^[10]。这种结构容易引起寄生模式的激励，所以往往是一种多模工作器件。在一般情况下，要求迴旋谐振脉塞振荡器单模单频工作，因此不得不采用相应的模式抑制技术。人们常用无源模式抑制技术——电动力学方法和电子学选择方法^[7,11]。然而这些方法容易导致器件的效率下降，同时当大电流工作，输出功率增加时，以上方法就根本抑制不了强大的寄生模式^[12]。所以人们便想到用有源的模式抑制办法，从而出现了外激励迴旋谐振脉塞同步振荡器^[13]。这种器件基本上解决了多模迴旋谐振脉塞振荡器中稳定的单模单频工作问题^[14]和效率问题。而外激励迴旋谐振脉塞同步振荡器又分为外信号直接送入主腔的外激励迴旋谐振脉塞同步振荡器和具有调制腔的外激励迴旋谐振脉塞双腔同步振荡器。后来又发展出性能良好的耦合腔型迴旋谐振脉塞双腔振荡器^[15]和外反馈迴旋谐振脉塞双腔振荡器。它们都是有前途的器件。

* 1981年9月21日收到。

二、迴旋谐振脉塞单腔振荡器

迴旋谐振脉塞单腔振荡器的电动力学系统是横向尺寸远大于波长的一个开放腔，一般是渐变开放腔、非渐变开放腔或同轴开放腔(图 1)。它的腔体既是群聚腔又是换能腔。在这种开放腔中必然存在多个分立模式^[16]。

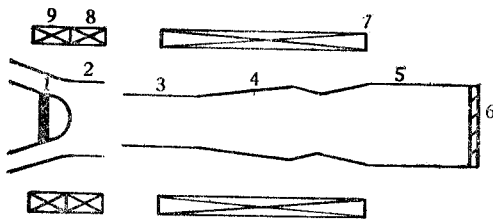


图 1 迴旋谐振脉塞单腔振荡器原理图
1. 阴极发射带 2. 第一阳极 3. 过截止段 4. 腔 5. 收集极 6. 输出窗
7. 主磁场线包 8, 9. 副磁场线包

Fig. 1 CRM-Monotron

1—Emitting strip 2—1st anode 3—Extra cutoff range 4—Cavity 5—Collector 6—Window of energy outlet 7—Primary solenoid 8, 9—Compensating solenoids

电子从阴极发出，在静电磁场的作用下作迴旋运动，经绝热压缩，具有一定横向能量后进入主腔。电子在主腔内群聚，并同高频场交换能量。高频功率从输出窗送出，电子则被收集极吸收。

这种器件的根本问题是难于获得稳定的单模单频工作。特别是在工作电流大、输出功率大的情况下，模式竞争更加激烈。尽管人们采用了各种无源模式抑制技术，但总难完全消除寄生模式。这是迴旋单腔管的主要缺点。迴旋单腔管通常采用的无源模式抑制技术是电动力学方法，即仔细地设计腔体的最佳截面，让寄生模式远离工作模式。这在磁场较稳，工作电流较小时，可以实现单模工作。另一种无源模式抑制技术是电子学选择方法，即改变腔区的磁位形，或者在腔的入口处放置石英玻璃涂上石墨的吸收体，以消除寄生模式。但即使采取了这样的一些措施，一旦工作电流加大，输出功率增加时，仍然会出现模式竞争问题。另外，采用无源的模式抑制技术还会导致效率下降。因此，尽管迴旋谐振脉塞单腔管结构简单，使用方便，但由于有严重的模式竞争问题，所以人们还是努力发展其他类型的迴旋谐振脉塞振荡器。

三、外激励迴旋谐振脉塞振荡器

为了很好地解决抑制寄生模式问题，使多模单腔管能稳定地单模单频工作，发展了外激励迴旋谐振脉塞振荡器。它分为两大类：一类是外激励信号直接送入主腔的迴旋谐振脉塞同步振荡器，另一类是具有调制腔的外激励迴旋谐振脉塞双腔同步振荡器。

1. 外激励迴旋谐振脉塞同步振荡器 从图 2 可见，外激励迴旋谐振脉塞同步振荡器的结构比迴旋谐振脉塞单腔振荡器增加了一套输入系统，以引入外激励信号。外激励信号由输入波导直接送入主腔，强迫管子的振荡频率与外激励信号频率相同，这就保证了单模单频工作。

根据文献 [13]，可以直接算出需要输入的外激励信号功率，数值是相当大的。输出功率为 100kW 时，输入功率高达 36kW。因此这种振荡器尽管在一定条件下能实现单模

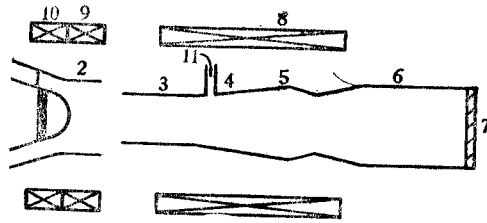


图2 外激励迴旋谐振脉塞同步振荡器原理图

1. 阴极发射带 2. 第一阳极 3. 过截止段 4. 输入波导 5. 腔 6. 收集极
7. 输出窗 8. 主磁场线包 9、10. 副磁场线包 11. 外信号

Fig. 2 CRM-Monotron synchronized by an external signal

1—Emitting strip 2—1st anode 3—Extra cutoff range 4—Input waveguide 5—Cavity 6—Collector 7—Window of energy outlet
8—Primary solenoid 9,10—Compensating solenoids 11—External signal

单频工作, 模式纯度较高, 工作区较宽而稳定, 但因需要的输入功率较大, 使效率与一般迴旋谐振脉塞单腔振荡器无多大差别。因此为了减小输入功率, 提高效率, 又发展了具有调制腔的外激励迴旋谐振脉塞双腔同步振荡器。

2. 外激励迴旋谐振脉塞双腔同步振荡器 从图3可知, 外激励迴旋谐振脉塞双腔同步振荡器的电动力学系统是由两个渐变或非渐变的开放腔(调制腔和主腔)和一段漂移管组成的。它比外激励迴旋谐振脉塞同步振荡器多一个调制腔, 调制腔具有输入结构。漂移管是一段波导, 它把两个腔隔离^[13]。

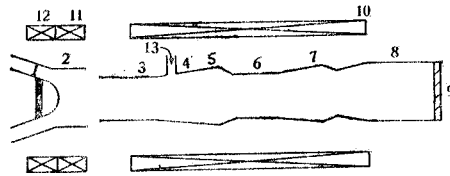


图3 外激励迴旋谐振脉塞双腔同步振荡器原理图

1. 阴极发射带 2. 第一阳极 3. 过截止段 4. 输入波导 5. 调制腔 6. 漂移段 7. 主腔 8. 收集极 9. 输出窗 10. 主磁场线包
11、12. 副磁场线包 13. 外激励信号

Fig. 3 Two-resonant CRM-Oscillator synchronized by an external signal

1—Emitting strip 2—1st anode 3—Extra cutoff range 4—Input waveguide 5—Modulating cavity 6—Drift tube 7—Primary cavity
8—Collector 9—Window of energy outlet 10—Primary solenoid
11, 12—Compensating solenoids 13—External signal

电子从阴极发出, 经绝热压缩, 成为具有一定横向能量的、均匀分布的电子束, 然后进入调制腔。电子束在该腔内受外激励信号的调制后, 再进入漂移区。在漂移区内它得到进一步群聚, 并在群聚达到最佳时, 进入主腔。电子束在主腔中与高频场换能, 产生振荡, 振荡频率与外激励信号频率相同。由于群聚和换能是在两个谐振腔中分别进行的, 所以效率高。

从这种振荡器的工作原理可以看出, 它的最大优点是不但模式纯度高, 而且效率也

高。由于有漂移管，电子在漂移管中可进一步得到群聚，这使输入功率可以大大减小^[13]，并使最佳的工作电流可小于迴旋单腔管。另外管子参数变化时，特别是工作电流增加时，效率下降不多。它的缺点是结构比较复杂，还需输入功率。

四、自激励迴旋谐振脉塞振荡器

1. 耦合腔型迴旋谐振脉塞双腔振荡器^[15] 耦合腔型迴旋谐振脉塞双腔振荡器的电动力学系统与外激励迴旋谐振脉塞双腔同步振荡器相似，只是把漂移管改成了耦合段，使两个腔体互相耦合，其工作原理与传统的耦合腔振荡器相似。

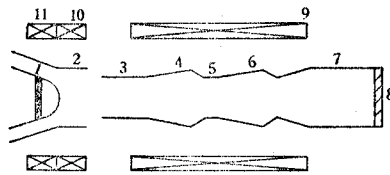


图 4 耦合腔型迴旋谐振脉塞双腔振荡器原理图

- 1. 阴极发射带 2. 第一阳极 3. 过截止段 4,6. 腔体 5. 耦合孔
- 7. 收集极 8. 输出窗 9. 主磁场线包 10,11. 副磁场线包

Fig. 4 CRM-Oscillator with coupling cavity

- 1—Emitting strip 2—1st anode 3—Extra cutoff range 4,6—Cavity
- 5—Coupling hole 7—Collector 8—Window of energy outlet
- 9—Primary solenoid 10,11—Compensating solenoids

这种振荡器具有一定模式纯度、结构简单、使用方便、无需外激励信号等优点。但模式纯度不如外激励迴旋谐振脉塞同步振荡器。这类器件 1974 年前后苏联白俄罗斯科学院明斯克应用物理研究所曾研制过^[14]，但未发表具体参数指标。看来它也是值得今后研究的一类器件。

2. 自激励迴旋谐振脉塞双腔振荡器 虽然外激励迴旋谐振脉塞振荡器实现了单模单频工作，提高了效率，但毕竟还需电平可观的外激励信号，管子结构比较复杂，使用较

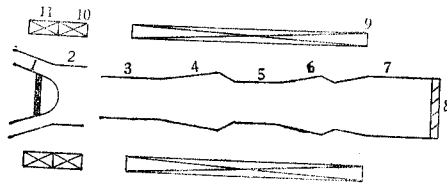


图 5 自激励迴旋谐振脉塞双腔振荡器原理图

- 1. 阴极发射带 2. 第一阳极 3. 过截止段 4. 调制腔 5. 漂移段
- 6. 主腔 7. 收集极 8. 输出窗 9. 主磁场线包 10,11. 副磁场线包

Fig. 5 Self-excited two-cavity CRM-Oscillator

- 1—Emitting strip 2—1st anode 3—Extra cutoff range 4—Modulating cavity 5—Drift tube 6—Primary cavity 7—Collector 8—Window of energy outlet 9—Primary solenoid 10,11—Compensating solenoids

不方便。我们根据几年来的制管经验,发现迴旋谐振脉塞单腔管在工作电流较小的情况下,很容易起振,便推想到研制自激励迴旋谐振脉塞双腔振荡器的可能性。美国海军实验室(NRL)朱国瑞教授1981年在成都讲学时,也提出了类似的想法。

这种振荡器的电动力学系统是由被一段漂移管隔离开的调制腔和主腔组成。这一系统不需要外加调制信号。电子束的调制由调制腔中产生的振荡来完成。调制腔与主腔频率一致,两腔之间无耦合。

显然这种类型的振荡器结构简单、使用方便,具有一定的模式纯度、效率也较高。但模式纯度还是不如外激励迴旋谐振脉塞双腔同步振荡器和具有外反馈的迴旋谐振脉塞双腔振荡器。

3. 具有外反馈的迴旋谐振脉塞双腔振荡器^[16] 在迴旋谐振脉塞单腔振荡器中,当电子束电流超过某一最佳值时,效率开始下降,相应的输出功率也下降^[1,18]。为了获得更大的输出功率,一般用降低腔体 Q 值的方法来增大束电流。但是谐振腔 Q 值的最小值为 $Q_{\min} \approx 4\pi(L/\lambda)^2$ (L 为谐振腔的有效长度, λ 为波长),要想借助于缩短谐振腔的长度来降低 Q 值,在一定的束电流下同步参数必然变坏,结果会使效率大大下降。另一方面研制更短波长的迴旋谐振脉塞振荡器时,需要用速度零散小的强流电子束。我们知道,电子光学系统的极限电流是随波长的缩短而下降的,因此更短波长的迴旋谐振脉塞振荡器,其工作电流往往达不到最佳值。如前所述,外激励迴旋谐振脉塞双腔振荡器的最佳工作电流相对较小,其同步参数的变化引起的效率下降不大^[19]。因此,调制腔中的电子束不是由外信号调制,而是由来自输出腔的反馈信号调制的迴旋谐振脉塞双腔振荡器也是很有吸引力的。

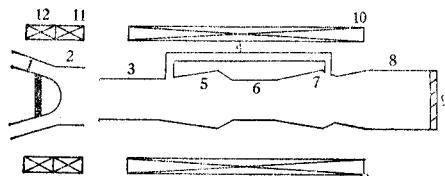


图6 具有外反馈的自激励迴旋谐振脉塞双腔振荡器原理图

1. 阴极发射带 2. 第一阳极 3. 过截止段 4. 外反馈回路 5. 调制腔
6. 漂移管 7. 主腔 8. 收集极 9. 输出窗 10. 主磁场线包 11、12. 副磁场线包

Fig. 6 Two-cavity CRM-Oscillator with external back-coupling

1—Emitting strip 2—1st anode 3—Extra cutoff range 4—External back-coupling circuit 5—Modulating cavity 6—Drift tube 7—Primary cavity 8—Collector 9—Window of energy outlet 10—Primary solenoid
11, 12—Compensating solenoids

具有外反馈的迴旋谐振脉塞双腔振荡器的电动力学系统是由两个缓变或非渐变的开放式谐振腔和一个波导段组成的。而这一波导段既是漂移管,又使两腔互相隔离。两腔之间的耦合是通过专门的反馈迴路实现的^[13]。

这种类型的迴旋谐振脉塞双腔振荡器的效率超过了迴旋谐振脉塞单腔振荡器。在均匀磁场下计算的横向电子效率 $\eta_{\perp} = 87\%$ ^[16]。在这种振荡器中可以采用低 Q 腔。可以在大电流和高功率电平下工作,效率降低不多。适当调节反馈耦合,可以使迴旋谐振脉塞双

腔振荡器的参数在较宽范围内变化,而效率变化不大,模式纯度也变化不大. 稳定工作区即宽又易于调整. 最佳工作区也较宽.

众所周知,磁场的纵向分布与效率有密切关系. 适当的调节腔区的磁位形,回旋谐振脉塞单腔管效率一般可以提高 1.4—1.7 倍^[20,21]. 美国海军实验室(NRL)朱国瑞教授采用渐变的上升磁场,在一定条件下,效率可达 68%^[20]. 苏联学者采用分段变化的磁场^[21],同样可以提高回旋器件的效率. 而对于某些回旋谐振脉塞放大器,调整输出腔的磁位形分布,同样可以提高放大管的效率^[22]. 所以说,如果在主腔采用适当的磁位形分布,是可望提高这类振荡器的效率的. 由此可见,这种回旋谐振脉塞双腔振荡器可能有高功率、短波长、高效率、高模式纯度、结构简单、使用方便等优点. 所以,它将是回旋谐振脉塞振荡器今后发展的值得注意的方向之一.

五、小 结

1. 回旋谐振脉塞单腔振荡器

优点: 管子结构简单;磁场结构简单;在功率较小、磁场较稳的情况下,可以实现单模单频工作.

缺点: 寄生模式较多,模式竞争激烈;效率不如双腔振荡器的高;工作区窄,最佳工作区不易调整.

2. 外激励回旋谐振脉塞同步振荡器

优点: 有效地抑制了寄生模式,工作模式的起振电流小,容易实现单模单频工作;效率与一般的回旋谐振脉塞单腔管接近;所需磁场分布易实现.

缺点: 管子结构较复杂;由于外信号直接送入主腔,所以需要的输入信号功率较大.

3. 外激励回旋谐振脉塞双腔同步振荡器

优点: 有效地抑制了寄生模式,易于实现稳定的单模单频工作;效率高,管子参数变化较大时,效率下降不大,需要的外激励输入信号的功率远小于上述第 2 种.

缺点: 管子结构复杂,磁场均匀区较长,仍需外激励信号.

4. 耦合腔型回旋谐振脉塞双腔振荡器

优点: 具有一定的模式纯度,效率高于回旋谐振脉塞单腔管,结构比较简单,使用方便,无需外激励信号.

缺点: 模式纯度不如第 3 种,高频系统的设计较难,最佳工作区较窄.

5. 自激励回旋谐振脉塞双腔振荡器

优点: 具有一定的模式纯度;无需外激励信号;管子结构比较简单;由于电子束的调制和换能是分开的,所以效率比回旋谐振脉塞单腔管高;使用方便.

缺点: 模式纯度不如第 3 种,磁场均匀区较长.

6. 具有外反馈的回旋谐振脉塞双腔振荡器

优点: 无需外激励信号;效率高,管子参数在较大范围内变化时,效率变化不大;模式纯度高,易于实现单膜单频工作;最佳工作电流小;工作区宽,易于调整工作点;使用方便.

缺点: 管子结构较复杂, 磁场均匀区较长。

总之, 迴旋谐振脉塞振荡器, 围绕着解决模式竞争和提高效率等问题, 经过多年研究, 演变出了多种类型, 其中以外激励迴旋谐振脉塞双腔同步振荡器和具有外反馈的迴旋谐振脉塞双腔振荡器具有功率大、效率高、模式纯度高, 可实现稳定的单模单频工作等优点。它们可能成为亚毫米波和毫米波较为理想的大功率振荡器。

本项工作中得到张静波、刘国政同志的支持和帮助, 并提供了大量有益的资料, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] A. B. Гапонов, А. Л. Гольденберг и М. И. Петелен, Изв. вузов-радиофизика, **18** (1975), 297.
- [2] М. И. Петелен, и В. К. Юлпатов, Изв. вузов-Радиофизика, **18** (1975), 139.
- [3] В. Л. Братман и А. Е. Токарев, Изв. вузов- Радиофизика, **17**(1974), 1224.
- [4] P. Sprangle et al, *Fourth International Conference on Infrared and Millimeter Waves and Their Applications*, 10—15(1979), 93.
- [5] М. И. Петелен, Изв. вузов-Радиофизика, **17**(1974), 902.
- [6] Д. В. Кисель, и Г. С. Кораблев, Радиотехника и Электроника, **22**(1977), 1661.
- [7] D. V. Kisel, G. S. Korralev, V. G. Navelev, M. I. Petelin and Sh. Ye. Tsimring, *Radio Engineering and Electronic Phys.*, **19**(1974), 65.
- [8] J. D. Silverstein, *Fourth International Conference on Infrared and Millimeter Waves and Their Applications*, 10—15(1979), 129.
- [9] Г. С. Нусинович, Изв. вузов-Радиофизика, **19** (1976), 1875.
- [10] С. Н. Власов и Л. И. Зарядекая, Радиотехника и Электроника, **21**(1976), 1485.
- [11] А. В. Гапонов, Изв. вузов-Радиофизика, **19** (1976), 1414.
- [12] В. Е. Запелов, И. Г. Зарницына и Г. С. Нусинович, Изв. вузов-Радиофизика, **22** (1979), 367.
- [13] В. С. Ергаков, М. А. Моисеев и В. И. Хижняк, Радиотехника и Электроника, **23** (1978), 2591.
- [14] В. С. Ергаков, М. А. Моисеев и Р. Э. Эри, Изв. вузов-Радиофизика, **19** (1976), 452.
- [15] И. С. Шевченко, Доклады Академии Наук БССР, **17**(1973), 909.
- [16] В. С. Ергаков, М. А. Моисеев и Р. Э. Эри, Изв. вузов- Радиофизика, **22**(1979), 1001.
- [17] 李强法, 物理学报, **29** (1980), 1405.
- [18] Н. И. Зайцев, Т. Б. Панкратова, и М. И. Петелен, Радиотехника и Электроника, **19**(1974), 1056.
- [19] В. С. Ергаков и М. И. Моисеев Изв. вузов-Радиофизика, **18** (1975), 120.
- [20] K. R. Chu, E. Read and K. Ganguly, IEEE Trans. on MTT, **MTT-28**(1980), 318.
- [21] В. Н. Глушенко, С. В. Кошева и В. А. Прус, Изв. вузов-СССР-Радиоэлектроника, **12**(1969), 998.
- [22] А. П. Кейер. Изв. вузов-Радиофизика, **21** (1978), 896.

CYCLOTRON RESONANCE MASER OSCILLATOR

Liao Zheng-jiu

(Institute of Electronics, Academia Sinica)

In this paper, the electrodynamic system, working principle and characteristics of a few different kinds of CRM-oscillators have been analyzed and compared. The analysis shows that two-resonant cavity synchronous CRM-oscillator with external signal and the two-resonant cavity CRM-oscillator with external back-coupling are ideal high power oscillators in the range of millimeter wave and submillimeter wave.