

# 太赫兹真空源斜注管高频结构研究

任大鹏 冯进军

(北京真空电子技术研究所, 大功率微波电真空器件技术国防科技重点实验室, 100015)

**摘要:** 斜注管的工作原理是将电子注稍微倾斜于慢波系统表面, 通过改变电子注的倾角, 来优化有效相互作用长度, 实现较高的输出功率和效率, 可以作为一种新型大功率太赫兹器件。本文就国外的发展情况进行了评述。初步设计了 W 波段斜注管的几何尺寸和电尺寸, 并对其“冷”特性进行了初步研究。

**关键词:** 斜注管; 太赫兹; 返波振荡器; 真空器件

## Analysis of Vacuum THz Source Clinotron Slow-Wave Structure

REN Da-peng, FENG Jin-un

(Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Vacuum Electronics National Laboratory, Beijing 100016, China)

**Abstract:** The working principle of the clinotron is slightly tilting the electron beam to the surface of the slow-wave system, optimizing the length of the effective interaction by varying the angle of the electron beam to obtain high output power and efficiency. The clinotron can be used as a new type of high power THz device. The development of the clinotron in foreign countries was reviewed in this paper. Moreover, we preliminary designed the physical dimension and the electrical size of the W-band clinotron, and also investigated its “cold” characteristic.

**Key words:** clinotron; THz; BWO; Vacuum device

### 引言

太赫兹波独特的性质在基础学科研究领域以及材料、通讯、国家安全技术等方面具有重大的科学价值和广阔的应用前景。研究紧凑、高效的太赫兹辐射源是太赫兹技术发展应用的基础与关键环节。本文主要介绍了国外斜注管的现状, 对今后发展的趋势做了相应的评述。初步设计了 W 波段斜注管的几何尺寸和电尺寸, 并对其“冷”特性进行了初步研究。

### 1 斜注管原理

国外文献中斜注管叫做: Clinotron 或 Klinotron, 最早由前苏联科学家发明, 在俄语中“Klin”是“楔入”的意思, 中文取名“斜注管”, 图 1 为其示意图。

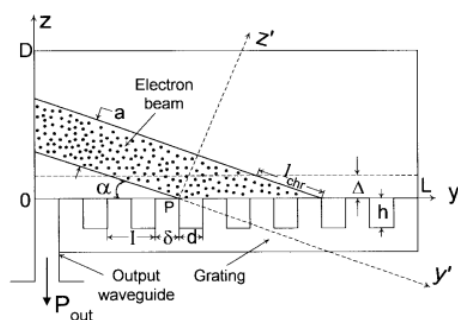


图 1 斜注管示意图

( $a$  是电子注厚度;  $b$  是电子注宽度 (未注明);  $\alpha$  是倾角;  $d$  是栅脊的宽度;  $\delta$  是栅槽的宽度;  $L$  是栅格的长度;  $D$  是栅格到对面壁的距离;  $B$  是腔体宽度 (未注明);  $\Delta$  是同步波场量层的特征厚度;  $l_{chr}$  是特征作用长度)

斜注管是一种基于返波振荡器的改进型器件, 其区别在于: 首先斜注管中存在的是驻波, 其次电子注是斜射在慢波结构表面, 通过改变电子注的倾斜角, 可以优化有效相互作用空间的长度, 而不用改变管子的几何形状, 电子注的厚度比常规返波振荡器中的大, 电子注的每一层都能与场进行有效作用, 可连续激起的单一谐振模式的工作频率的电子调谐较大, 并能得到较大的效率和输出功率。

### 2 国外研究现状

乌克兰已经研制出不同型号的斜注管, 并用于合成信号源、等离子诊断、雷达、保密通信等领域。器件覆盖了从 50GHz 到 500GHz 的频率范围。斜注管具有良好的电子调谐特性, 通过小范围的改变工作电压实现较大的电子调谐。工作在 100GHz 和 450GHz 的斜注管的输出功率分别达到 3 瓦和 0.1 瓦输出功率。太赫兹斜注管外形如图 2。



图 2 太赫兹斜注管外形图

在理论方面, 国外的研究主要包括“冷”特性分析及注波互作用研究。

## 2.1 “冷”特性分析

W. I. Kleen采用近似边界条件的方法即功率流匹配的方法得出本征频率的色散方程:

$$\frac{1}{k_r \tan(k_r h)} = \Theta \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{S_n^2}{\gamma_n \tanh(\gamma_n D)}$$

其中  $S_n = \sin(k_n d/2)/(k_n d/2)$ ,

$\gamma_n = \sqrt{k_n^2 - k_r^2}$ , 而  $k_n = \frac{2n\pi}{l} + \frac{\pi m}{L}$  是传播常数,

$k_r = \frac{\omega_r}{c}$ ,  $\Theta = d/l$ 。

R.A.Silin对矩形栅边值问题进行了简化处理, 其中最主要的是简化槽区内场的表示, 把它表示为一无限的傅里叶级数的形式, 普遍的处理方法是只取其最低模式, 称为单模近似法, 在结构周期远小于真空中基模波长的情况下, 理论与实验符合很好。

为了得到更精确的结果, Brian D. McVey等利用场匹配法将矩形栅分为两个区域, 无栅格的区域为一区(传输区 $Z>0$ ), 有栅格的区域为二区( $Z<0$ )。在一区将电场表示为一系列Bloch分量之和的形式, 在二区将场表示为一系列本征模式的叠加。利用两个区的边界条件, 推导出本征频率的色散方程。

A. Kirilenko利用模式耦合理论通过计算电磁波在慢波结构中传播的散射矩阵和周期结构中两个单元之间的距离 $\delta$ , 可以求出特征方程, 事实上这种方法可以计算任意形状的周期结构的色散特性。

经过分析可以发现 W. I. Kleen 与 R.A.Silin 的方法是相近的, 得出的结果也比较一致, Brian D. McVey, Mark A. Basten 与乌克兰科学院无线电物理和电子学研究所的 A. Kirilenko, D. Kulik, S. Steshenko, V. Tkachenko 等的方法在本质上是相同的, 区别在于前者采用场匹配法, 后者利用模式耦合理论。

## 2.2 注波互作用研究

研究电子注倾角与注波互作用的关系是斜注管互作用研究的基础, G. Y. Levin 等人早期主要研究了斜注管中电子注最佳倾角 $\alpha_{opt}$ 的导出以及 $\alpha_{opt}$ 与输出功率的关系。

K. Shtinmann 和 D.M. Vavriv 等人建立了非线性理论。对于工作在 3mm 波段的斜注管, 谐振腔模式从 15 变化到 41 时, 各个模式的起振电流和

加速电压的关系如图 3 所示。在较宽的频带内, 可以通过改变加速电压来连续激起不同谐振模式的振荡。K.schunemann 还进一步推导给出了最小起振电流公式和最大效率的近似表达式。

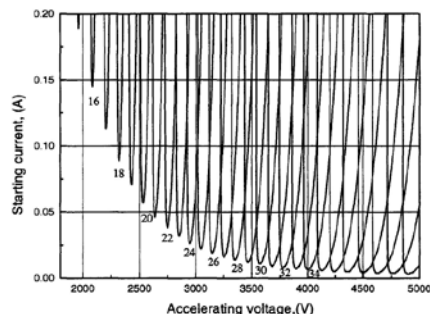


图 3 谐振腔模式在不同模式下的起振电流和加速电压

通过分析得到结论为, 电子注的倾角对斜注管的起振电流、效率等参数有着至关重要的联系, 要想实现较高的效率、较低的起振电流, 需要采用合理的磁场分布, 对电子注进行聚焦, 并优化电子注的倾角。这也将是斜注管向更高频段、更大功率发展的一个关键。

## 3 W 波段斜注管高频结构设计及“冷”特性计算

大功率微波电真空器件技术国防科技重点实验室正在开展 W 波段斜注管的研究。首先对 W 波段斜注管高频结构进行了理论分析和“冷”特性计算。

在斜注管中, 电磁场是一系列驻波场, 每组驻波是由传播常数分别是  $k_n$  和  $-k_n$  的空间谐波叠加而成。电子束的初始速度  $v_0$  和负一次空间谐波的相速度相同步。负一次空间谐波传播常数为  $-k_{-1} = 2\pi/l - \pi m/L$ 。将这些同步谐波的传播常数表示为  $k_{sh}$ , 相应的相速度为  $v_{ph} = \omega_r/k_{sh}$ , 此时随着  $m$  的变化, 可以得出腔体的本征频率与同步谐波的速度  $v_{ph}$  的关系, 也就是斜注管的色散特性, 利用 MATLAB 软件编制了色散曲线计算程序, 计算结果如图 4 所示。

耦合阻抗是行波管和返波管研究中一个重要参量, 对斜注管的研究和设计也具有一定的参考意义。采用功率流匹配法, 推导出斜注管的耦合阻抗的表达式如下式。采用大型计算软件对 W 波段斜注管高频结构“冷”特性进行模拟验证。

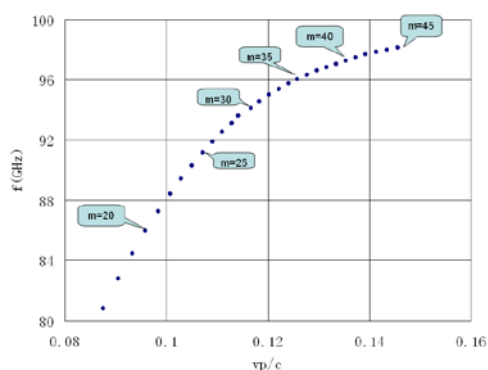


图 4 本征频率与同步波的相速度  $v_{ph} = \omega_r / k_{sh}$  的关系  
(模式  $m = 17-45$ )

$Kc =$

$$\frac{[e^{-jk_1 s/2} \sin c(k_1 s/2) \sinh[v_{-1}(h-y)]]^2}{[(\sinh(v_{-1}h)) \int_{\sigma} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \cosh[v_n(h-y)] e^{jk_n z} / (v_n \sinh(v_n h))]^2 d\sigma}$$

利用 CST 公司的微波工作室软件,建立了 W 波段斜注管高频模型,如图 5 所示。利用谐振法得出斜注管的耦合阻抗如图 6 所示。



图 5.斜注管高频结构模型

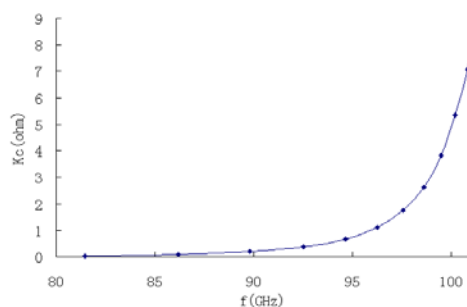


图 6 W 波段斜注管高频结构耦合阻抗

最终,初步设计出 W 波段斜注管的几何尺寸和电尺寸。

## 4 技术分析 with 结论

限制斜注管向着更高频率,更高功率发展的技术瓶颈主要有:一、电子注的形成和聚焦;二、斜注管中多物理场耦合的机制;三、电子注直接轰击高频结构引起的散热问题;四、高频结构的加工问题。

对于斜注管互作用的分析,除了对理论进行深入研究外,有必要借助多物理场模拟软件,对整管进行建模,模拟电子注与高频场、高频结构之间电磁相互作用、热互作用的情况,为合理设计斜注管提供有益的参考。传统的加工技术加工斜注管的高频结构会遇到很大的困难,但是立体三维微细加工技术 UV-LIGA 正好具备这方面优势,UV-LIGA 技术可以满足 300GHz 以上金属零件对精度和表面光洁度的要求。微细加工技术为斜注管向微型化、高频率方向发展开辟了一条新路。可以预见,使用先进的 UV-LIGA 技术和多物理场模拟软件,斜注管能够在小型化、高频段、大功率方向取得突破。

## 参 考 文 献

- [1] K. Schtinemann, D.M. Vavriv. Theory of the Clinotron[J]. IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, 1999, 46(11)
- [2] McVey B D, Basten MA, Booske JH, et al. Analysis of rectangular waveguide gratings for amplifier applications[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1994, 1(42):995-1003
- [3] 冯进军. 集成真空电子学发展[J]真空电子技术, 2010 (2)

任大鹏 男, 1983 年生, 硕士研究生。主要研究方向: 斜注管理论与计算机仿真。

E-mail:xiaoxi0303@126.com

冯进军 男, 1966 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为大功率微波毫米波太赫兹真空电子器件。