

## 397 GHz 斜注管互作用系统的设计模拟

苏思铭, 冯进军

(北京真空电子技术研究所 微波电真空器件国家重点实验室, 北京 100015)

**摘 要:** 斜注管是返波振荡器的一种, 通过电子注的倾斜, 电子距离慢波结构更近, 高频场更强, 耦合阻抗和互作用效率更高, 显著增加输出功率。对带状注斜注管的互作用系统进行了设计, 并首次将双排齿慢波结构应用于斜注管。利用电磁模拟软件和 3D 粒子模拟软件对设计的斜注管的色散曲线和场分布进行了分析, 并对其注-波互作用进行了模拟, 可以得到大于 100 mW 的输出功率以及 50 GHz 的调谐带宽。输出功率在 370.5 GHz 频点处处达到峰值 2.3 W, 电子注电压 7.0 kV, 注电流 120 mA, 聚焦磁场 1.0 T。

**关键词:** 斜注管; 互作用系统; 带状注; 双排齿波导; 太赫兹

**中图分类号:** TN125

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11884/HPLPB201931.190368

## Design and simulation of beam-wave interaction system of 397 GHz clinotron

Su Siming, Feng Jinjun

(Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Vacuum Electronics National Laboratory, Beijing 100015, China)

**Abstract:** Clinotron is a modification of the backward-wave oscillator. In clinotron the electron beam is inclined to slow wave structure (SWS). Due to the inclined electron beam, electrons are closer to SWS and can interact with stronger electric field, which leads to a higher output power and interaction efficiency. In this paper, the interaction system of clinotron is designed, and the double corrugated waveguide SWS is applied in clinotron for the first time. The dispersion curves, field distribution and beam-wave interaction are simulated with electromagnetic codes and 3D PIC codes. The result shows that more than 100 mW output power and a 50 GHz tuning bandwidth can be obtained. The simulation results show that the maximum output power is 2.3 W at frequency of 370.5 GHz with beam voltage 7.0 kV, beam current 120 mA and guiding magnetic field of 1.0 T.

**Key words:** clinotron; interaction system; sheet beam; double corrugated waveguide; terahertz

**PACS:** 84.47.+w; 84.40.Fe; 84.30.Ng

随着电磁波频谱的开发利用, 电真空技术也得到了发展。传统的微波管在 W 波段已经可以稳定有效地工作, 但随着人们对信息需求量的增大, 促使微波管的工作频段向着更高的方向发展, 即太赫兹波段。虽然太赫兹技术的发展潜力巨大, 但制约其发展的原因之一是缺乏合适的太赫兹辐射源。应用场景中需要紧凑的、高功率、高效率、可调谐太赫兹辐射源, 然而现有的太赫兹源的功率较低, 不易被收集利用。斜注管正好解决了这一问题。斜注管作为一种太赫兹辐射源, 是由乌克兰国家科学院 (NASU) 射电天文学研究所的 Levin 等人于 1992 年提出的<sup>[1]</sup>。在斜注管中, 电子注是倾斜于慢波结构的, 这样可使电子与慢波结构更接近, 与更强的电场相互作用从而增加输出功率, 提高互作用效率。斜注管腔内的慢波结构末端没有吸收器, 在电子注的入口和出口发生强反射。斜注管是振荡器件, 它的频率调谐范围可达到约为 15%<sup>[2]</sup>。目前开发出的 345~390 GHz 的斜注管输出功率为 100 mW, 272~334 GHz 的斜注管输出功率为 50~100 mW<sup>[3]</sup>。国内对斜注管的研究处于软件模拟阶段。2011 年任大鹏等人设计了 W 波段斜注管的慢波结构, 并对注-波互作用过程进行了模拟<sup>[4]</sup>。2015 年姚若妍设计出 0.1 THz 矩形单栅、0.4 THz 矩形单栅、0.65 THz 正弦波导、1.5 THz 交错双栅慢波结构斜注管并进行注-波互作用过程模拟<sup>[5]</sup>。2016 年王晨曦对 0.34 THz 矩形单栅斜注管慢波结构进行设计并讨论其加工工艺和损耗<sup>[6]</sup>。斜注管常用于生物学、医学和材料学的太赫兹成像技术以及动态核磁共振光谱技术<sup>[7-8]</sup>。

本文主要设计了 350~400 GHz 斜注管互作用系统中的双排齿慢波结构, 并研究了其色散特性和耦合阻抗。利用 3D 粒子软件对注-波互作用过程进行了模拟, 结果表明该互作用系统的调谐范围为 347~397 GHz, 对应的调

谐电压为 6~12 kV, 可以获得大于 100 mW 的输出功率和 50 GHz 的调谐带宽以及较为纯净的频谱。

### 1 斜注管的冷特性分析

斜注管的注-波相互作用系统示意图如图 1 所示。图 2 展示了所用双排齿慢波结构的三视图。双排齿慢波结构对圆形电子注和带状电子注具有良好的兼容性, 且由于双排齿结构的特点, 齿顶附近叠加得到的场强较强, 为慢波结构的应用提供了可能。双排齿波导中的主要结构参数为外波导宽度  $b=0.3$  mm, 齿高  $h=0.16$  mm、齿间距  $g=0.05$  mm、齿宽  $w=0.14$  mm、慢波结构周期  $p=0.1$  mm 以及槽宽  $s=0.035$  mm。斜注管中, 与电子注发生相互作用的是返波, 波能量的传递方向与电子运动方向相反, 故能量输出位于电子注输入端一侧<sup>[4]</sup>。

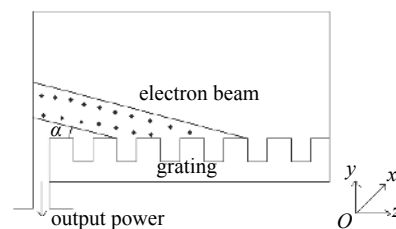


Fig. 1 Beam-wave interaction system of the clinotron  
图 1 斜注管注-波相互作用系统示意图

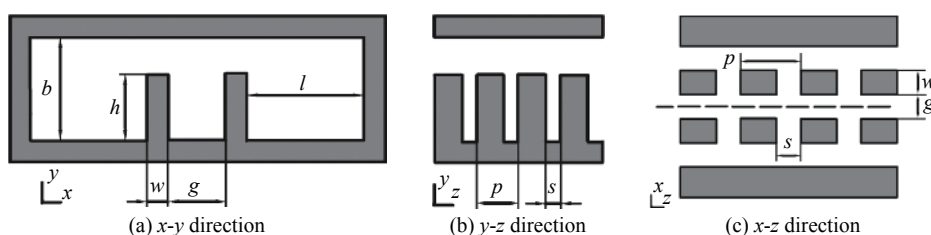


Fig. 2 Structure diagram of the double corrugated waveguide SWS

图 2 斜注管慢波结构三视图

对于双排齿慢波结构, 可以使用近似计算的方法求其色散方程<sup>[9]</sup>

$$Y_0(\phi) = 2 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \sin \frac{\phi}{2} \left\{ \frac{2w}{s} \sin \frac{\phi}{2} + \frac{p-s}{p} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n \frac{\sin \frac{\beta_n s}{2} \sin \frac{\beta_n (p-s)}{2}}{\beta_n s \beta_n (p-s)} \left[ \text{cth} \beta_n l + \text{cth} \beta_n g - \frac{1}{\text{sh} \beta_n g} \right] \right\} \quad (1)$$

$$Y_0(\phi) = D(f) \quad (2)$$

$$D(f) = \omega C \tan kh \quad (3)$$

式中:  $\epsilon_0$ 和 $\mu_0$ 为理想条件下的介电常数和磁导率;  $n$ 为空间谐波的波数;  $\phi$ 为周期相移;  $\omega$ 为角频率;  $k = \omega/c$ , 其中 $c$ 为光速; 约化电容 $C = 1.6^{[10]}$ ; 其他参数如图 2 所示。

在 CST 微波工作室中, 建立一个单周期的双排齿慢波结构, 如图 3 所示。利用本征模式求解器来计算其色散曲线。图 4 为由公式计算得到的色散曲线与用 CST 软件模拟得到的色散曲线的对比图。由图可见, 周期相移在  $0.2\pi \sim 1.8\pi$  区间时, 模拟曲线与理论计算拟合度较好, 设计中的斜注管工作的周期相移区间在  $1.3\pi \sim 1.7\pi$ , 故理论计算虽存在误差, 但对斜注管的设计的影响可忽略。设计的斜注管工作频段为 350~410 GHz, 电压调谐范围为

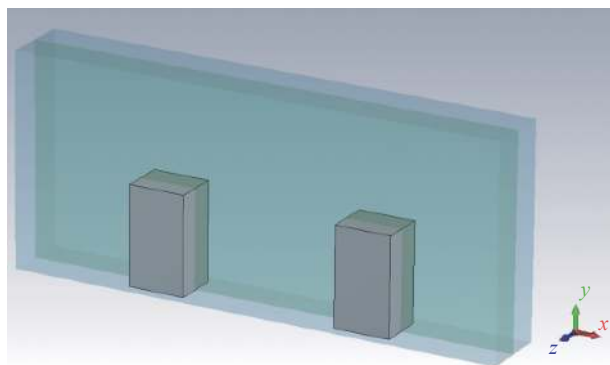


Fig. 3 Solid model of one single period slow wave structure (SWS) in CST

图 3 CST 微波工作室中建立的单周期慢波结构模型

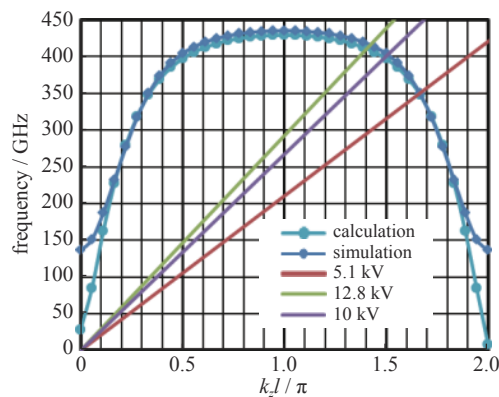


Fig. 4 Comparison of calculation and simulation dispersion curves in the SWS

图 4 计算与模拟得到的斜注管慢波结构色散曲线

5.1~12.8 kV。

耦合阻抗常用于衡量电子注与轴向场的相互作用效果。利用 CST 软件中的后处理功能,可以求出单周期双排齿慢波结构的耦合阻抗,结果如图 5 所示,计算的位置在双排齿中心距离齿顶 0.05 mm 的位置(电子注中心位置),如图 6 所示。

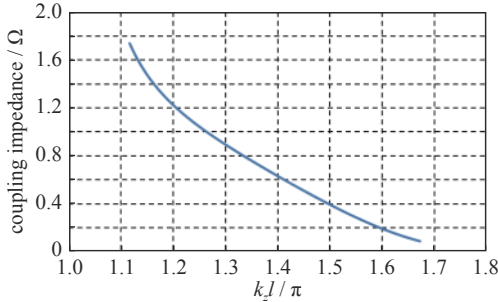


Fig. 5 Coupling impedance of the SWS  
图 5 单周期双排齿慢波结构的耦合阻抗

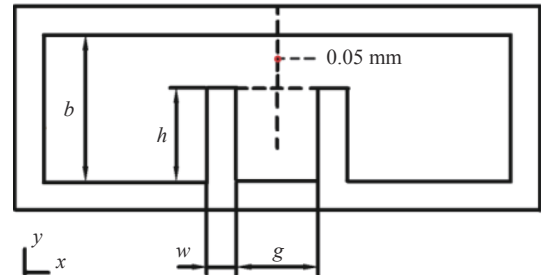


Fig. 6 Calculation point of coupling impedance  
图 6 耦合阻抗的计算位置

## 2 斜注管的相互作用过程模拟

CST 软件中建立的斜注管相互作用系统的模型图如图 7 所示,其中左侧所示为电子注输入端及能量输出端,右侧为慢波结构反射端。电子注尺寸  $0.5 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ , 电流 120 mA, 倾斜角  $0.2^\circ$ , 聚焦磁场强度  $1.0 \text{ T}$ <sup>[10]</sup>, 材料的电导率  $1.6 \times 10^7 \text{ S/m}$ <sup>[11-13]</sup>。带状电子注由图中左侧的矩形结构发出,输出端口的的位置与电子注输入端同侧,在慢波结构的底部,由正下方的波导将能量引出。相互作用系统的末端被反射面封住,这样可以利用反射形成振荡,与反射面相连的是半周期的双排齿。

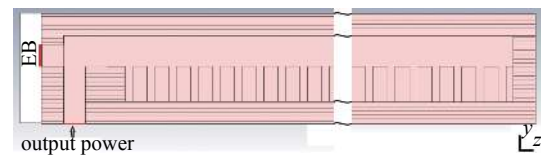


Fig. 7 Interaction section of clinotron solid model in CST  
图 7 CST 软件中的斜注管相互作用系统模型

图 8 示出了电子注在行进过程中的形状变化,图 8(a)为观测位置距离输入端 0.5 mm 处的截面图,图 8(b)为观测位置距离输入端 4.5 mm 处的截面图。由图可见,电子注截面在入射时可近似看成矩形,随着电子注的行进,磁场对其作用,使得电子在纵向(y 方向)有一定的下移,但截面形状还能近似保持矩形,这证明了聚焦磁场选值的合理性。图 9 示出了电子注在相互作用系统末端发生的群聚现象。

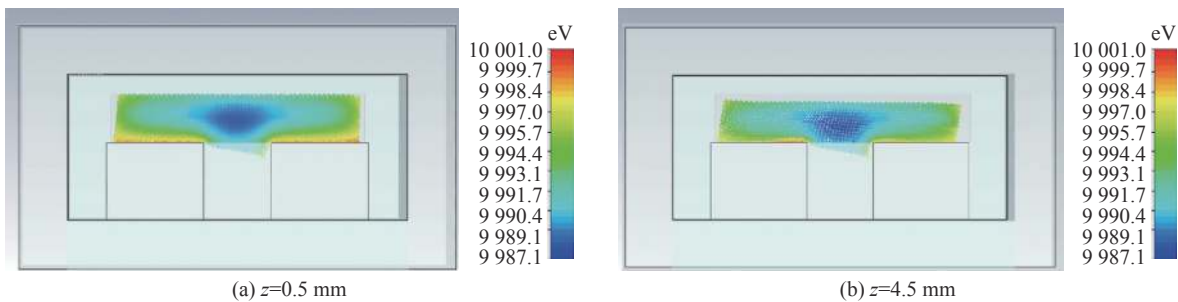


Fig. 8 Sheet beam cross section in CST model  
图 8 CST 模拟的电子注形态

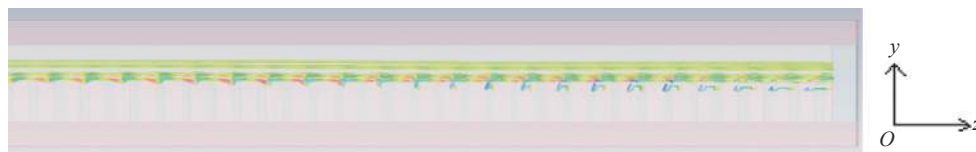


Fig. 9 Electron bunching at the end of the interaction section  
图 9 相互作用系统末端的电子群聚

图 10 示出了斜注管相互作用系统的电压调谐曲线。由图可见,电压相同时由模拟得到的工作频率比色散曲线的频率稍低,这是因为电子速度只有在略高于波的相速时才能传递能量,而且由于电子注与慢波结构间存在的场导致的电位沉降现象,使得电子速度比所加电压对应的速度要低。图 11 示出了相互作用系统的输出功率随频率变

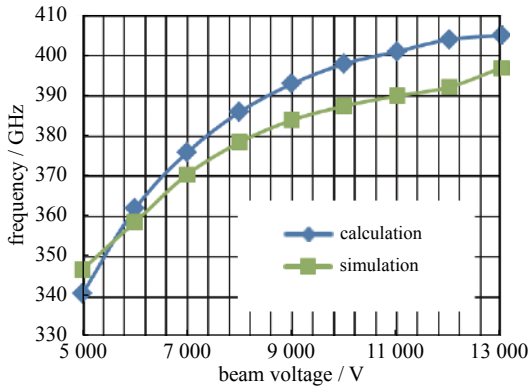


Fig. 10 Operating frequency versus beam voltage

图 10 电压调谐曲线

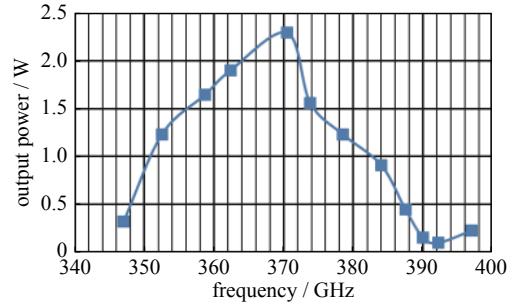


Fig. 11 Simulated output power in CST

图 11 CST 软件模拟的相互作用系统输出功率曲线

化的关系曲线。虽然设计频段为 350~410 GHz, 但由于低频段区域的耦合阻抗较低, 导致输出功率大幅下降; 而在高频段区域, 随着电压的增长, 频率变化不够明显。当电压达到 12.8 kV 时, 频率并未达到 410 GHz, 而是在 400 GHz 附近缓慢增长。故最终得到的斜注管相互作用系统的频段为 347~397 GHz, 对应的调谐电压为 5.1~12.8 kV。输出功率为最高值时工作频率为 370.5 GHz, 图 12 示出了输出功率最大时的输出端口的电场, 计算得到的输出功率如图 13 所示。图 14 和图 15 分别为工作频率 370.5 GHz 和 397 GHz 情况下, 输出信号通过快速傅里叶变换后的谱线。可以看出, 输出信号的频谱较为纯净, 斜注管相互作用系统的设计合理。

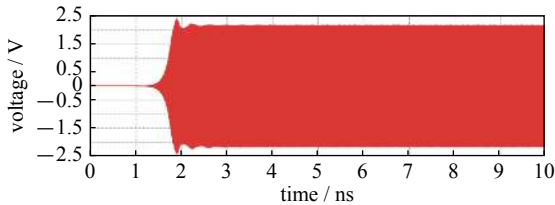


Fig. 12 Electric field versus time

图 12 模拟得到的 370 GHz 频点的电场随时间变化的函数

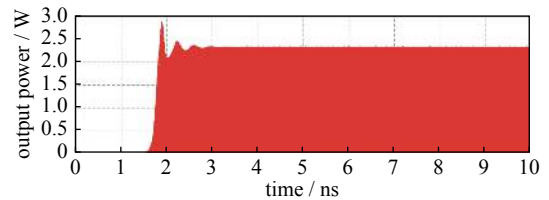


Fig. 13 Simulated output power

图 13 模拟得到的 370 GHz 频点端口输出功率

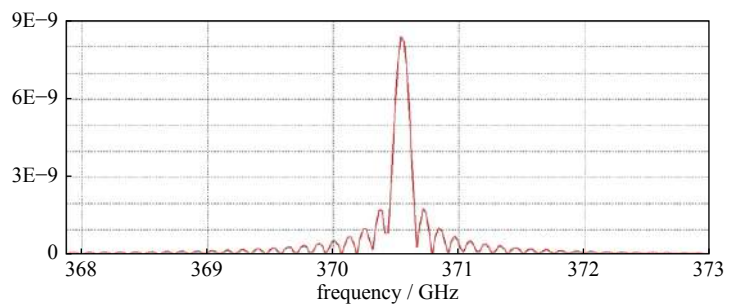
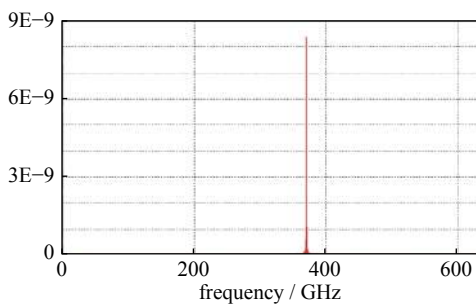


Fig. 14 Frequency spectrum through FFT (370.5 GHz)

图 14 370.5 GHz 频点的快速傅里叶变换谱线

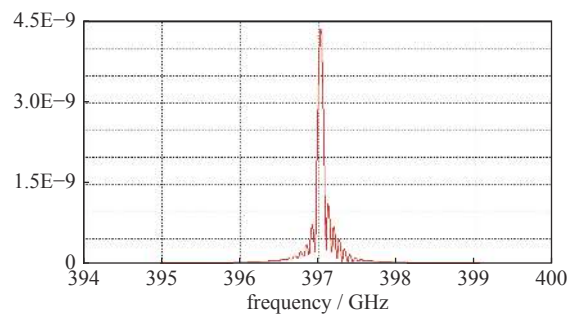
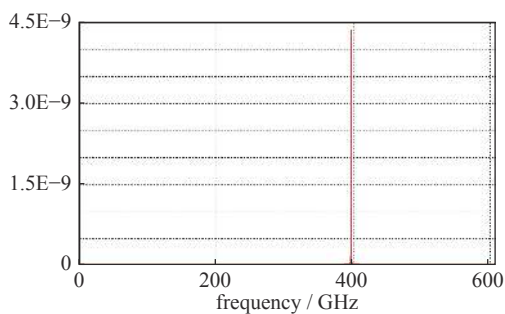


Fig. 15 Frequency spectrum through FFT (397 GHz)

图 15 397 GHz 频点的快速傅里叶变换谱线

### 3 结 论

本文介绍了斜注管的注-波相互作用系统的设计过程,首次将双排齿慢波结构应用于斜注管中。确定了慢波结构的结构参数,并进行了冷特性模拟以及相互作用过程的模拟。在347~397 GHz 调谐范围内得到了大于100 mW 的输出功率。

#### 参考文献:

- [1] Levin G Y, Borodkin A I, Kirichenko A Y, et al. The clinotron[C]//22th European Microwave Conference. 1992: 603-607.
- [2] Molokovsky S I, Sushkov A D. Intense electron and ion beams[M]. Berlin: Springer, 2005: 27-45.
- [3] Ponomarenko S S, Kishko S A, Khutoryan E, et al. Development of CW clinotron oscillator at 400 GHz[C]//International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. 2012: 348-352.
- [4] 任大鹏, 冯进军. W波段斜注管高频结构的设计和注波相互作用模拟[J]. 真空电子技术, 2011, 48(6): 21-25. (Ren Dapeng, Feng Jinjun. Design and simulation of the beam-wave interaction system of W-band clinotron. *Vacuum Electronics*, 2011, 48(6): 21-25)
- [5] 姚若妍. 太赫兹斜注管的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015. (Yao Ruoyan. Research on the terahertz clinotron. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.)
- [6] 王晨曦. THz斜注管的设计和高频损耗研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016. (Wang Chenxi. Study on THz clinotron and high frequency loss. Hefei: Hefei University of Technology, 2016)
- [7] Ponomarenko S S, Kovshov Y S, Kishko S A, et al. Development of compact CW clinotrons for DNP-NMR spectroscopy[C]//2016 IEEE Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW). 2016.
- [8] Vavriv D M, Somov A V, Schünemann K. Clinotron based terahertz imaging system[C]//THz and Security Applications. 2013: 229-237.
- [9] Hu Yulu, Hu Quan, Nauro M, et al. Dispersion characteristics of double-corrugated rectangular waveguide for terahertz vacuum devices[C]//2015 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 2015: 1-2.
- [10] Nishiyama H, Nakamura M. Form and capacitance of parallel-plate capacitors[J]. *IEEE Trans Components, Packaging, and Manufacturing Technology—part A*, 1994, 17: 477-484.
- [11] Gilmour A S Jr. Klystrons, traveling wave tubes, magnetrons, crossed-field amplifiers, and gyrotrons[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 97.
- [12] Hammerstad E, Jensen O. Accurate models for micro-strip computer-aided design[C]//IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 1980: 28-30.
- [13] Yang B B, Kirley M P, Booske J H. Theoretical and empirical evaluation of surface roughness effects on conductivity in the terahertz regime[J]. *IEEE Trans Terahertz Science & Technology*, 2014, 4(3): 368-375.