

文章编号: 2095-4980(2022)01-0067-07

## 0.5 THz 双电子注返波管注波相互作用的高频结构优化

杨龙龙<sup>1,2</sup>, 刘文鑫<sup>\*2</sup>, 赵征远<sup>1,2</sup>, 欧 粤<sup>2</sup>

(1.中国科学院大学 微电子学院, 北京 100039; 2.中国科学院 空天信息创新研究院, 北京 100094)

**摘要:** 返波振荡器是一种重要的真空电子学太赫兹源, 具有高功率、高工作频率和宽带调谐等特点。为提高圆形电子注与光栅慢波结构的互作用, 提出一种双电子注嵌入矩形光栅的慢波结构, 使电子注与光栅表面电场更好地充分相互作用, 从而提高互作用效率和输出功率。通过数值求解和仿真计算其色散特性, 结果表明, 相比于相同结构参数的普通矩形单栅, 该结构可以实现更高的工作频率和耦合阻抗。利用 CST 进行 PIC 仿真, 优化结构和电子注参数, 最终得到工作频率 501 GHz, 10.6 W 的稳定输出。研究成果为设计 0.5 THz 的返波管提供了理论指导。

**关键词:** 注波相互作用; 返波管; 矩形栅; 太赫兹源; 色散特性; 慢波结构

**中图分类号:** TN927

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2021022

## Structure optimization and beam wave interaction of 0.5 THz rectangular grating BWO with double beams

YANG Longlong<sup>1,2</sup>, LIU Wenxin<sup>\*2</sup>, ZHAO Zhengyuan<sup>1,2</sup>, OU Yue<sup>2</sup>

(1.School of Microelectronics, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China;

2.Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Backward Wave Oscillator(BWO) is one of the most attractive terahertz sources belong to the vacuum electron devices, which has superior performances in power capacity, high frequency, and bandwidth. For the purpose of improving the interaction between the circular electron beam and the grating slow-wave structure in BWO, a novel slow-wave structure with double electron beams embedded in the rectangular grating is proposed. The dispersion characteristics of such structure are verified by numerical calculation and simulation part, and the results show that it can achieve higher operating frequency and coupling impedance compared with a common rectangular single grating with the same structural parameters. Moreover, PIC simulations are carried out to optimize its structure, and a stable output 10.6 W with 501 GHz frequency is obtained. This research would provide guidance for the design of 0.5 THz BWO.

**Keywords:** beam wave interaction; backward wave tube; rectangular grating; terahertz source; dispersion characteristics; slow wave system

太赫兹辐射是一种新的、有许多独特优点的辐射源<sup>[1]</sup>。在通信、雷达、电子对抗、电磁武器、天文学、医学成像、安全检查等领域具有非常广泛而富有前景的用途<sup>[2-6]</sup>。但由于缺乏有效的太赫兹辐射产生和检测手段, 太赫兹在各个领域的应用并不多, 因此如何研制出理想的太赫兹辐射源是制约太赫兹波应用的重要问题。

在众多太赫兹辐射源中, 太赫兹返波管(BWO)具有可在常温下工作、宽带调谐、谱线窄、效率高、输出功率大、信号输出提取方便等优势, 适合作为高功率太赫兹波振荡器<sup>[7]</sup>。在返波管中, 慢波结构是注波相互作用系统的关键结构, 矩形光栅慢波结构具有结构紧凑、加工精确度极高、可用于短波长和小尺寸的特点<sup>[8]</sup>, 适合在工作频率很高的太赫兹返波管中用作慢波结构。

相关领域的学者提出了一些新的矩形光栅慢波结构, 如余弦形状的矩形光栅慢波结构、脊加载开放式矩形光栅、阶梯槽交错双栅慢波结构等。余弦形矩形栅可以减小慢波反射, 具有弱色散和宽带宽, 但是增大带宽的同

收稿日期: 2021-01-13; 修回日期: 2021-03-14

基金项目: 国家自然科学基金重大项目资助(U1832193; 61831001); 国家重点研发计划资助项目(2017YFE0130000; 2017YFA0701003)

\*通信作者: 刘文鑫 email:lwenxin@mail.ie.ac.cn

时,小信号增益也减少了<sup>[9-10]</sup>。脊加载开放式矩形光栅能够在深槽下显著改善高频特性,增大带宽,有良好的热耗散能力<sup>[11]</sup>。阶梯槽交错双栅能够改善高频特性,增大带宽,同时又有足够高的耦合阻抗,机械强度高<sup>[12]</sup>。但这些结构都具有加工难度大,设计复杂等缺点。为了提高慢波结构的耦合阻抗,同时便于加工,本文提出一种双电子注入单矩形栅慢波结构,将电子注嵌入到矩形光栅的开孔之中。这一开孔结构可以充分利用光栅端面的纵向电场,使电子注位于强场中,获得更高的输出功率。研究了矩形栅的高频特性和耦合阻抗,并根据 CST 的 PIC 仿真确定了慢波结构周期长度,优化了结构参数,得到了 10.6 W 的稳定输出,为 0.5 THz 双电子注加载矩形栅返波管的实际研制提供了依据。

## 1 高频特性

### 1.1 结构模型

该慢波结构的周期模型如图 1 所示,双电子注嵌入矩形栅慢波结构是在普通单栅结构的基础上,在光栅表面开了 2 个中心对称的方形孔,圆电子注从孔中穿过。设定同步电压为 24 kV,中心频率为 500 GHz,此时同步点的相移为  $1.5\pi$ 。利用平面矩形单栅的色散方程数值得到慢波结构的大致参数<sup>[13-14]</sup>,再对开孔结构进行 CST 仿真得到准确的色散曲线,对结构参数进行微调。根据仿真计算和加工条件,确定了慢波结构的具体参数:矩形栅周期长度  $p$  为 0.14 mm,槽宽  $d$  为周期长度的一半,波导高度  $b$  为 0.4 mm,槽深  $h$  为 0.11 mm,光栅宽度  $w$  为 0.45 mm,开孔宽度  $u$  取 0.12 mm,深度  $q$  取 0.06 mm,开孔之间的距离  $v$  为 0.04 mm。

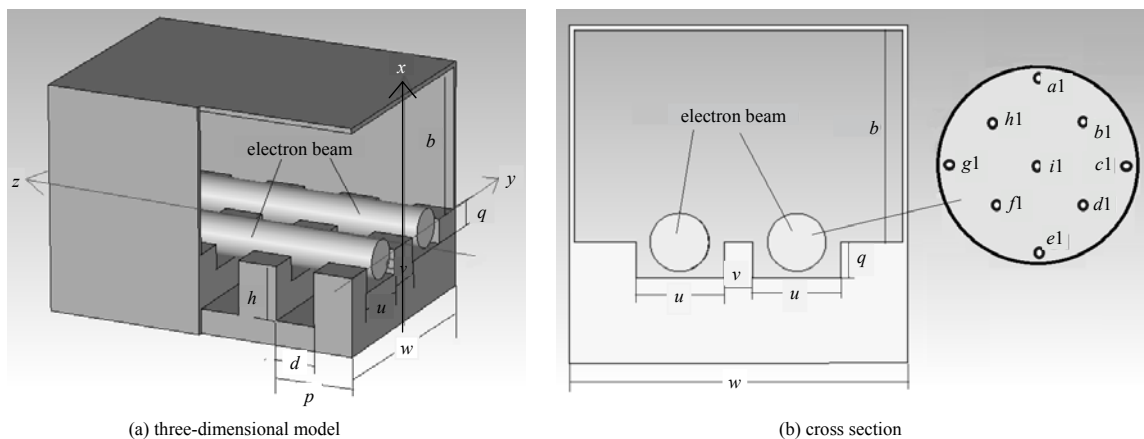


Fig.1 Geometry for the rectangular grating with double beams

图 1 双电子注嵌入矩形栅慢波结构模型

### 1.2 色散特性

描述慢波结构主要特性的参数有两个:一个是色散特性;另一个是耦合阻抗。作为慢波结构的重要特性,色散特性描述了系统中电磁波相速度和频率之间的关系。本文将色散曲线表示为频率和纵向相位的曲线。利用 CST 本征求解器得到各参数对色散曲线的影响,如图 2 所示,其中曲线为色散曲线,直线为工作电压 24 kV 时的电子注线。可以看出,随着周期长度  $p$  的增大,上限频率大大降低,工作点也迅速下移;波导高度  $b$  对色散频率影响很小,只稍微改变了色散曲线的“胖瘦”程度,并没有对上下限频率造成较大影响;槽深度  $h$  对色散影响很大,改变微小的值,工作频带范围就会有很大变化;波导宽度  $w$  变大时,对应的色散曲线整体向下移动,尤其是对下限频率的影响更大。此外,开孔尺寸对色散曲线也有较大影响,随着开孔深度  $q$  的增大,色散曲线的上限频率随之降低。开孔宽度  $u$  则对色散曲线影响较小。

### 1.3 耦合阻抗

为进一步研究结构参数对该慢波结构注波相互作用强弱的影响,比较了不同结构参数下慢波结构的耦合阻抗。由于电子注区域的耦合阻抗并不处处相等,如图 1(b)所示,在圆形电子注区域等间距取了  $a1 \sim i1$  共 9 个点,根据皮尔斯的定义和返波管的工作特性,每个点的耦合阻抗计算公式为  $K_c = |E_{z-1}|^2 / 2k_{-1}^2 P$ ,其中  $E_{z-1}$  为  $-1$  次空间谐波在电子注通道相应点处的纵向电场幅值,  $k_{-1}$  为  $-1$  次空间谐波的单周期相移,  $P$  为慢波结构的总功率流。取  $a1 \sim i1$  点耦合阻抗的平均值,利用 HFSS 计算出不同频率下的耦合阻抗。由于耦合阻抗随周期长度  $p$ 、栅宽  $w$ 、

槽深  $h$  等参数的变化趋势和单矩形栅的一致, 故不在这赘述, 只给出开孔尺寸和电子注入位置对耦合阻抗的影响。如图 3 所示, 当开孔宽度  $u$  增大后, 耦合阻抗随之减小, 这是因为慢波是表面波, 开孔尺寸增大后, 纵向电场强度随垂直方向距离的增大而减小, 耦合阻抗随之降低。同样的, 增加开孔深度  $q$ , 也会减少耦合阻抗。而当电子注中心和栅表面的相对距离  $\delta$  变大时, 即离开孔越远, 耦合阻抗越小。

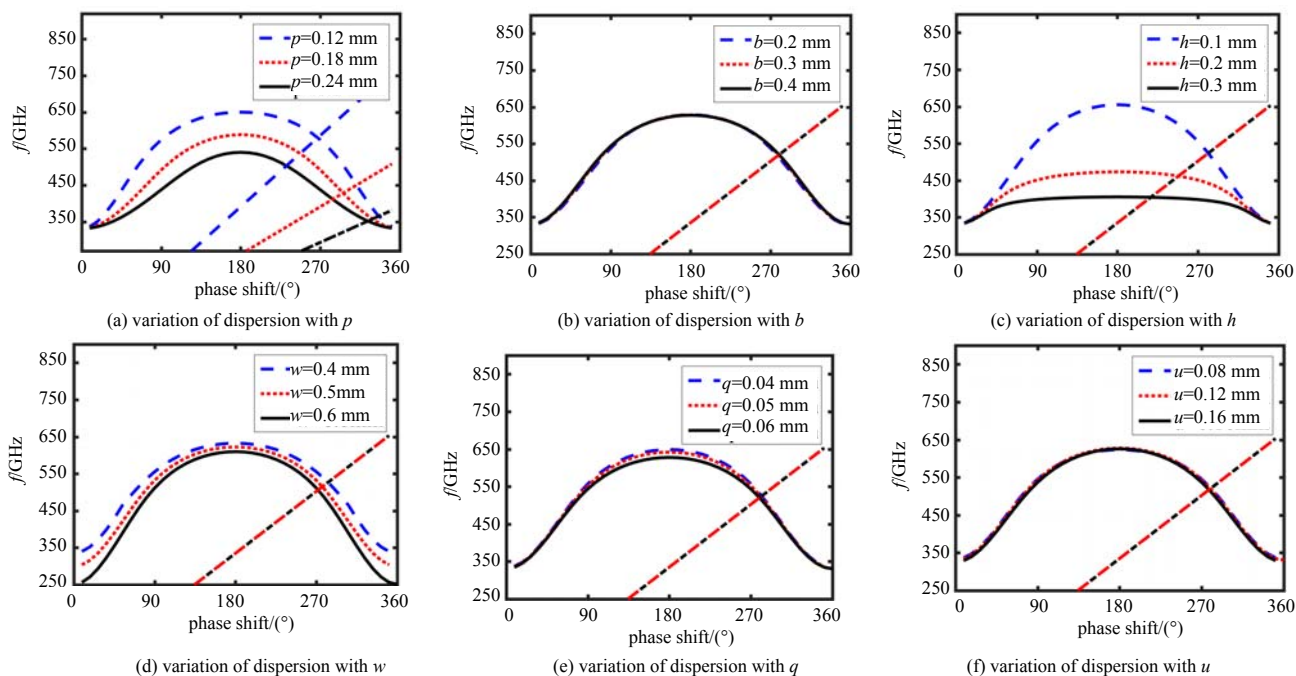


Fig.2 Impact of the dimensions of the slot-structure on the dispersion  
图 2 各参数对色散曲线的影响

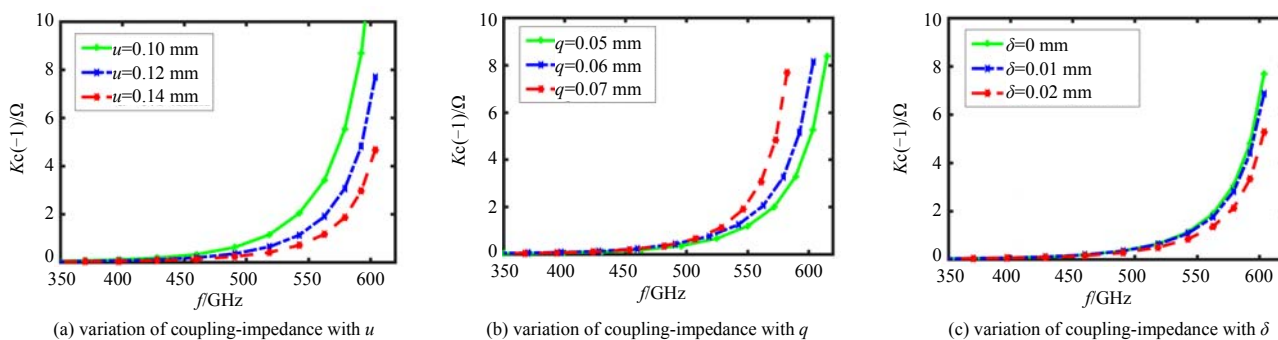


Fig.3 Impact of the dimensions of the slot-structure on the coupling-impedance  
图 3 各参数对耦合阻抗的影响

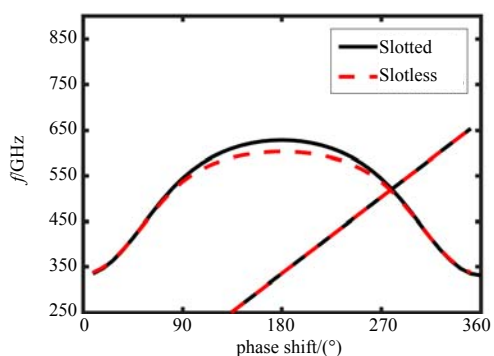


Fig.4 Influence of the slot structure on the dispersion  
图 4 开孔对色散的影响

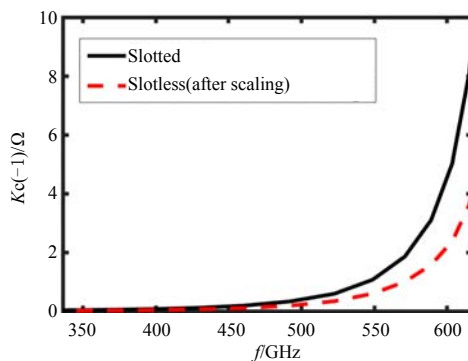


Fig.5 Influence of the slot structure on the coupling-impedance  
图 5 开孔对耦合阻抗的影响

为体现双电子注嵌入矩形栅结构所具有的优势,本文比较了相同结构参数下,双电子注嵌入矩形栅结构和普通平面单栅的色散曲线以及 $-1$ 次谐波耦合阻抗。如图 4 所示,开孔结构色散曲线上限频率更高,这意味着开孔结构具有更高的工作频率上限。在相同的相移下,开孔结构的频率远高于无孔结构的频率。根据尺寸共渡效应,以相同的比例缩小无槽结构的尺寸,使其频带下降到与开槽结构相同的范围内,然后计算其耦合阻抗。计算结果如图 5 所示,开孔结构的耦合阻抗明显高于普通单栅慢波结构的耦合阻抗,注波相互作用也会更强。

## 2 结构优化和注波相互作用研究

### 2.1 返波振荡器模型

返波振荡器的结构如图 6 所示,输出器采用波导形式,根据返波管的工作频率,选择标准波导 WR-1.5。为减少反射,需设计慢波过渡结构,过长的过渡不利于电子注传输,且增加了工艺的复杂度,为此过渡结构设计较为简洁。由于工作频率很高,考虑到导体表面粗糙度带来的损耗,经过计算,电导率设为  $1.9 \times 10^7 \text{ S/m}^{[15-16]}$ 。此外,本文还采用了 BeO-SiC 作为衰减器材料,该材料具有功率容量大,散热性能好的特点。模拟时设置该材料的介电常数为 11,损耗角正切为 0.35,需要指出的是,该介电常数和损耗角正切均为在 110 GHz 工作时测得<sup>[17]</sup>,工作在 500 GHz 时的参数测量现有技术还无法达到,因此借鉴其他频段的参数。利用 CST-MWS 计算其  $S$  参数,得到的结果如图 7 所示,可以看到,在 400~515 GHz 频段,反射系数  $S_{11}$  在  $-15 \text{ dB}$  附近,  $S_{21}$  大于  $-4 \text{ dB}$ ,具有较好的传输特性。

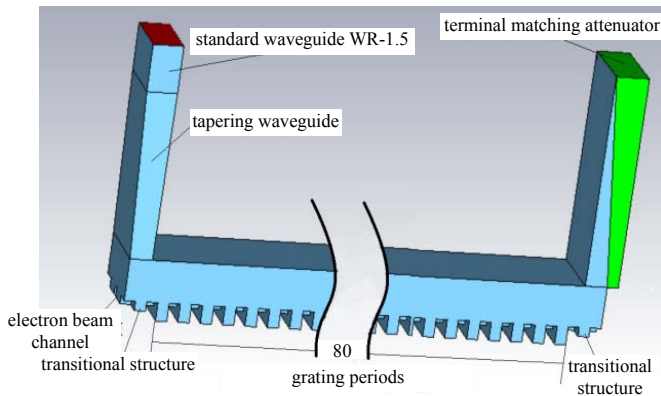


Fig.6 Geometry for the backward wave oscillator  
图 6 返波振荡器模型

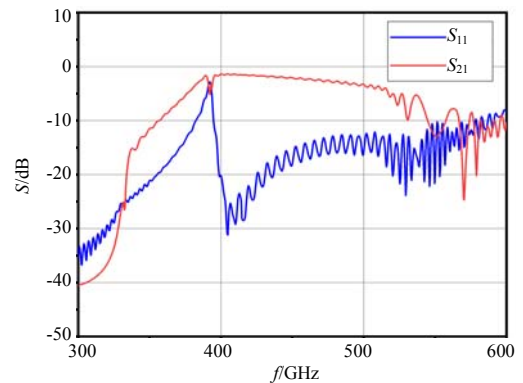
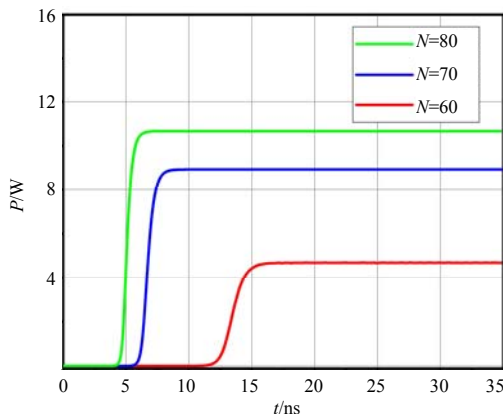
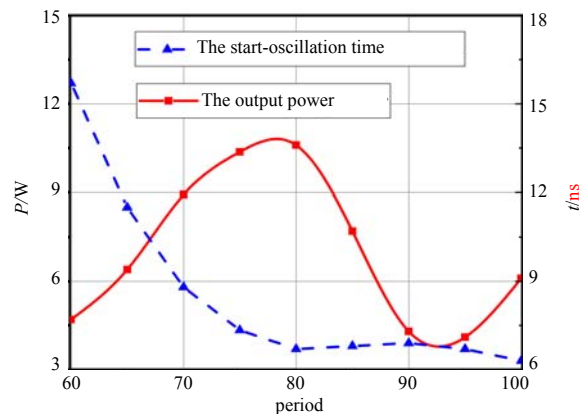


Fig.7 Simulated  $S_{11}$  and  $S_{21}$  harmonic modes  
图 7  $S$  参数



(a) variation of the output with period number



(b) output characteristic with different lengths

Fig.8 Impact of period number on the output  
图 8 周期数对返波管输出参数的影响

### 2.2 PIC 粒子模拟与结果分析

根据数值计算和仿真的结果,确定了 500 GHz 返波管双电子注嵌入矩形栅慢波结构的参数,利用 CST 的 PIC 求解器对矩形栅的三维大信号注波相互作用进行仿真计算。为了得到稳定的输出,根据仿真结果微调结构参数。每个电子注电流设为 20 mA,电子注半径设为 0.05 mm,纵向施加 1 T 的均匀磁场来保证电子注的良好传输。为了

让返波管工作在 500 GHz，工作电压设为 24 kV。图 8 为不同周期数对输出特性的影响，周期数不同时，振荡器的输出功率和起振时间都不同。在保持输出稳定的情况下，取 60~100 周期数做比较，如图 8(b)所示，用样条曲线拟合计算点，随着周期数增大，起振时间减少，起振越容易。但周期数并不是越大越好，随着周期数的增大，输出功率先增大后减小，在 80 周期附近取得最大值，为取得较好的输出功率，选择周期数为 80，此时的输出功率为 10.6 W。

图 9 为电流对输出参数的影响，用样条曲线拟合计算点，增大电流可有效增大输出功率。当电流从 10 mA 增加至 60 mA 时，输出功率从 3.75 W 增加至 33.1 W；电流从 10 mA 增大至 50 mA 时，输出功率基本保持了线性增长；当电流大于 50 mA 后，输出功率增长放缓，这是因为过高的电流会使电子注发生过群聚，同时电流过大也使得阴极电流密度过大，对阴极的材料和加工要求大大提高，因此阴极电流不宜太大。此外，电流对起振时间的影响也很大，随着电流的增大，起振时间越短，返波管越容易起振。

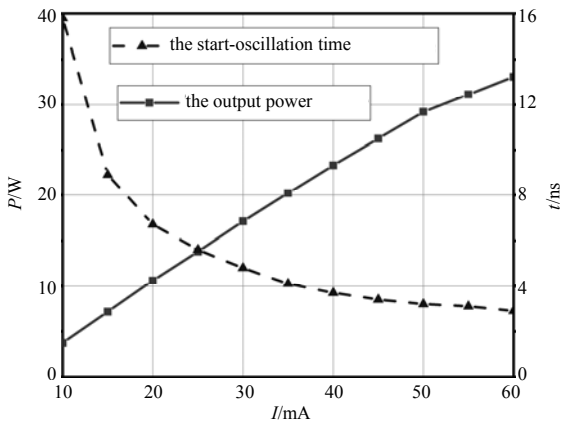


Fig.9 Dependence of the output on the current  
图 9 阴极电流对返波管输出参数的影响

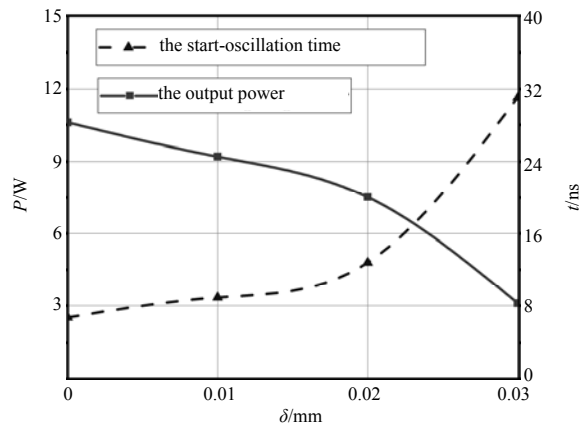


Fig.10 Impact of the height of electron beam on the output  
图 10 电子注相对高度对返波管输出参数的影响

改变电子注中心位置也会对输出造成较大影响。如图 10 所示，用样条曲线拟合计算点， $\delta$  代表电子注中心与栅表面相对高度，同时也是表征电子注嵌入开孔深度的一个参量， $\delta$  越大，表示电子注嵌入开孔深度越浅，起振时间越长，输出功率也随之变小，这也说明开孔能有效增强注波相互作用，增大输出功率。

根据仿真结果和现有的材料条件，取电子注电压 24 kV，电流 20 mA，纵向磁场为 1 T。在 CST 粒子工作室建立模型，设置好边界条件，进行粒子相互作用模拟。如图 11 所示，计算结果为 10.6 W。对输出功率进行 FFT 变换，得到的功率谱如图 12 所示，可以看到输出频谱很纯，峰值功率对应的频率为 501 GHz。

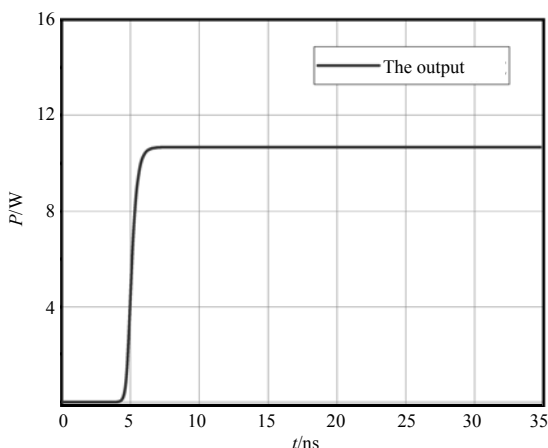


Fig.11 Time evolution of the output power  
图 11 CST 仿真输出图

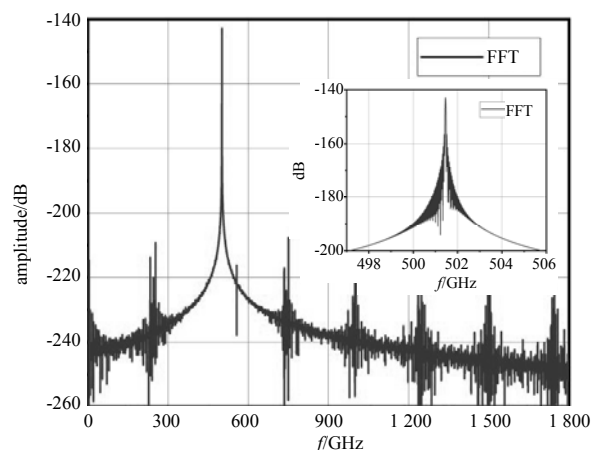


Fig.12 FFT spectrum of the output power  
图 12 输出功率频谱图

返波管作为一种宽频带电子调谐的微波振荡器，可调谐是其最重要的特性之一<sup>[18]</sup>。改变电子注电压，就可以改变返波管的振荡频率。保持阴极电流与其他结构参数不变，改变工作电压，经过 CST PIC 仿真，即可得到返波管的电子调谐特性。如图 13 所示，用样条曲线拟合计算点，当工作电压从 21 kV 上升至 26 kV，工作频率也从 480 GHz 上升到 514 GHz，相应的输出特性由图 14 给出，可以看出在 488~504 GHz 频率范围内，电子效率

均大于 1%，随着电压的增大，输出功率和电子效率先增大后减小，在工作频率为 500 GHz 附近输出功率最大，在 495 GHz 附近电子效率取得最大值 1.18%。在图 5 中，慢波结构-1 次谐波耦合阻抗随着工作频率增大而增大，而电子效率跟耦合阻抗成正相关性<sup>[19]</sup>，因此增大工作电压，工作频率增大，电子效率也随之增大。但是当电压增大到一定值后，电子的群聚情况变坏，输出功率反而变小。

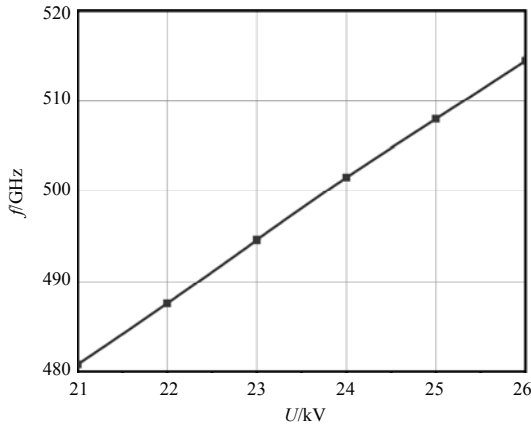


Fig.13 Variation of the oscillation frequency with the working voltage  
图 13 返波振荡器电子调谐特性

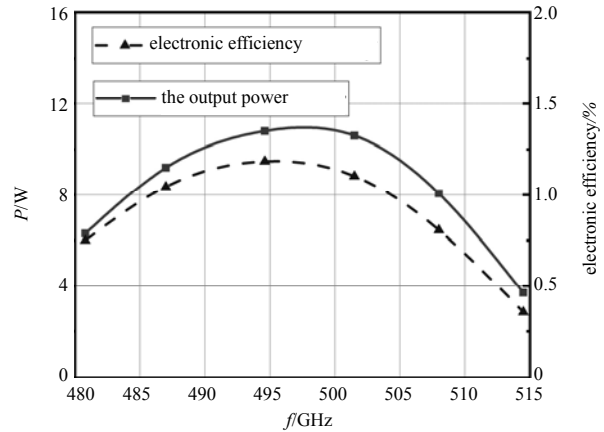


Fig.14 Output characteristics of BWO  
图 14 返波振荡器输出特性

### 3 结论

本文提出一种双电子注嵌入矩形栅慢波结构，根据普通单栅的理论色散方程和 CST 仿真结果设计了 0.5 THz 的双电子注嵌入矩形栅慢波结构返波管。研究了双电子注嵌入矩形栅的色散特性和耦合阻抗，通过注波相互作用仿真确定了合适的结构参数，得到了 10.6 W 的稳定输出。仿真计算结果表明，相较于传统单栅，新结构具有更好的色散特性和更高的耦合阻抗，具有较宽的调谐特性。这些研究为双电子注嵌入矩形栅返波管的工程研制提供了参照依据。

#### 参考文献：

- [1] LIU Shenggang. The possible contributions of vacuum electronics to terahertz radiation sources[C]// IEEE International Conference on Vacuum Electronics. Seoul,Korea(South):IEEE, 2003:357-358.
- [2] GONG Aiping,QIU Yating,CHEN Xiaowan,et al. Biomedical applications of terahertz technology[J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2019,55(5):418-438.
- [3] LIU Wenxin,ZHANG Zhaochuan,ZHAO Chao,et al. Development of a subterahertz folded-waveguide extended interaction oscillator[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017,45(7):1731-1738.
- [4] ALLERANOG P G,BIEDRON S. Overview of therahertz radiation sources[C]// 26th International Free Electron Laser Conference and 11th FEL User Workshop(FEL 04). Trieste,Italy:[s.n.], 2004:216-221.
- [5] LIU Wenxin,YE Qingqing,GUO Xin,et al. Investigation on 0.5 THz backward wave oscillator based on two-section rectangular gratings[C]// 2019 International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Busan,Korea (South):[s.n.], 2019:1-2.
- [6] BATRA A,WIEMELER M,GOEHRINGER D,et al. Comparison analysis of small and large bandwidth indoor SAR multi-object imaging at low terahertz spectrum[C]// 2020 45th International Conference on Infrared,Millimeter, and Terahertz Waves(IRMMW-THz). Buffalo,NY,USA:[s.n.], 2020:1-2.
- [7] 胡林林,蔡金赤,陈洪斌. 太赫兹返波振荡器的应用及研究进展[J]. 电子学报, 2016,44(4):974-982. (HU Linlin,CAI Jinchi,CHEN Hongbin. Applications and development of terahertz backward wave oscillators[J]. ACTA ELECTRONICA SINICA, 2016,44(4):974-982.)
- [8] LIU Wenxin,YANG Ziqiang,LIANG Zheng. Dispersion characteristics of a grating-waveguide for terahertz radiation[C]// 2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. Hangzhou,China:IEEE, 2007:404-407.
- [9] LU Zhigang,GONG Yubin,WEI Yanyu,et al. Study on rectangular waveguide grating slow-wave structure with cosine-shaped grooves[C]// 2006 Joint 31st International Conference on Infrared Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics. Shanghai,China:IEEE, 2006.



- [10] 路志刚,宫玉彬,魏彦玉,等. 任意槽矩形波导栅行波管注-波相互作用线性理论研究[J]. 红外与毫米波学报, 2008,27(5):370-373. (LU Zhigang,GONG Yubin,WEI Yanyu,et al. Linear theory of beam-wave interaction in arbitrary groove rectangular waveguide grating traveling wave tube[J]. Journal of Infrared Millimeter Waves, 2008,27(5):370-373.)
- [11] FU C,ZHAO B,YANG Y,et al. Novel slow-wave structure with ridged open rectangular grating for MM-wave traveling wave tube[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2015,35(10):1174-1179.
- [12] XIE W Q,WANG Z C,LUO J R,et al. Theory and simulations of high frequency characteristics for a staggered double-grating slow-wave structure with step-shaped grooves[J]. Acta Physica Sinica(Chinese Edition), 2014,63(1):2693-2702.
- [14] MCVEY B D,BASTEN M A,BOOSKE J H,et al. Analysis of rectangular waveguide-gratings for amplifier applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1994,42(6):995-1003.
- [15] 王冠军. 矩形栅波导慢波系统的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2005. (WANG Guanjun. Research on rectangular grating waveguide slow wave system[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2005.)
- [16] 张芳,董志伟. 345 GHz 微折叠波导慢波结构的粗糙度和加工垂直度[J]. 强激光与粒子束, 2014,26(6):212-216. (ZHANG Fang,DONG Zhiwei. Waveguide roughness and exposure steepness for 345 GHz folded waveguide traveling wave tube[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014,26(6):212-216.)
- [17] 李浩光,杨军,邓光晟,等. 太赫兹双通道行波管高频系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(1):13-17. (LI Haoguang,YANG Jun,DENG Guangsheng,et al. Terahertz high frequency structure with double channels[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(1):13-17.)
- [18] CALAME J P,ARVENM G,LOBAS D,et al. Broadband microwave and W-band characterization of BeO-SiC and AlN-based lossy dielectric composites for vacuum electronics[C]// Vacuum Electronics Conference, 2006 held jointly with 2006 IEEE International Vacuum Electron Sources,IEEE International. CA,USA:IEEE, 2006:37-38.
- [19] 李珏岐. THz 返波管的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2011. (LI Jueqi. Research on THz backward wave tube[D]. Chengdu, China:University of Electronic Science and Technology of China, 2011.)
- [20] BOOSKE J H,DOBBS R J,JOYE C D,et al. Vacuum electronic high power terahertz sources[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011,1(1):54-75.

#### 作者简介:

杨龙龙(1995-), 男, 甘肃省平凉市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹真空电器件 .email: yanglonglong18@mails.ucas.ac.cn.

赵征远(1996-), 男, 浙江省绍兴市人, 硕士, 主要研究方向为太赫兹源慢波结构.

刘文鑫(1976-), 男, 湖南省衡阳市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为毫米波及太赫兹源、高功率微波.

欧 粤(1996-), 男, 湖南省衡阳市人, 硕士, 主要研究方向为太赫兹真空电器件.