

返波激励的级联折叠波导行波放大器

刘冬^{1,2}, 刘文鑫^{1*}, 王勇¹, 李科^{1,2}

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

2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要:利用折叠波导返波振荡器(FW-BWO)作为激励源,用于激励工作频率为 216 GHz 的折叠波导行波放大器.利用 3D-Magic 进行仿真实验,通过仿真优化,最终得到 96 W 的输出功率,整个电路的长度被设计为只有 1 cm 左右.通过该方法,显著地缩短了高频结构长度,有利于实现小型化的真空电子学太赫兹源,对集成化的太赫兹源设计具有重要的参考价值.

关键词:折叠波导返波振荡器(FW-BWO)驱动;多电子注;折叠波导;行波管;太赫兹

中图分类号:TN124 **文献标识码:**A

Cascade folded waveguide traveling-wave tube amplifier driven by backward-wave

LIU Dong^{1,2}, LIU Wen-Xin^{1*}, WANG Yong¹, LI Ke^{1,2}

(1. Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A folded waveguide traveling-wave tube (FW-TWT) amplifier which is driven by backward-wave has been studied in this paper. Folded waveguide backward oscillator (FW-BWO) is used as driven source and drives the traveling-wave tube amplifier. The working frequency of FW-BWO is 216GHz. The optimized results were simulated by 3D-Magic. By optimizing the length and height of the loss-material and the current of cathode, the output power of the FW-TWT is 96W. The length of the waveguide is only about one centimeter.

Key words: folded waveguide backward oscillator(FW-BWO)-driving, multi-beam, folded waveguide, traveling-wave tube (TWT), terahertz (THz)

PACS: 84. 30. Ng, 41. 75. -i, 84. 40. Dc, 84. 40. Fe, 07. 57. -c, 13. 40-f

引言

由于太赫兹(THz)波具有穿透性,瞬态性,低能性等特点,所以在生物医学、医药、通信、国防等方面都有重要的作用^[1]. 目前,产生太赫兹波的太赫兹源有真空电子学、光学和半导体电子学. 真空电子学太赫兹源具有功率大、可室温工作等优点,成为一类

重要的太赫兹源^[2]. 在真空电子学太赫兹源中,有太赫兹行波放大器、返波振荡器、扩展相互作用振荡器、扩展相互作用速调管放大等^[3]. 在真空电子学太赫兹源,由于器件尺寸与工作波长的共渡关系,随着工作波长减少,器件尺寸显著缩小,器件研制难度显著增大,特别是实现注-波相互作用的高频结构是器件的研制难点和重点^[4]. 在高频结构中,有螺旋线、耦

收稿日期:2015-12-08,修回日期:2016-04-01

Received date: 2015-12-08, revised date: 2016-04-01

基金项目:国家自然科学基金(10905032,11275004),中国科学院知识创新重要方向性项目(YYYJ-1123-5),国家高技术研究计划项目(2012AA8122007A)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(10905032), Knowledge Innovative Program of Chinese Academy of Sciences(YYYJ-1123-5), National High Technology Research Program of China(2012AA8122007A)

作者简介(Biography):刘冬(1986-),女,四川德阳人,博士研究生,主要研究领域为太赫兹器件. E-mail: xuanyaliudong@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: lwenxin@mail.ie.ac.cn

合腔和折叠波导等形式^[5]. 但是由于螺旋线和耦合腔的结构特点, 难以适应高频段器件的发展. 折叠波导高频结构由于结构简单、可以与微细制作方法兼容等优点而成为毫米波及太赫兹器件的高频结构的重点发展对象^[6].

1987 年, Northrop Grumman 公司首先提出用矩形曲折波导作为行波管的高频相互作用电路. 这种结构的优点在于散热好, 功率容量大, 全金属, 易加工等^[7] 在折叠波导太赫兹源的发展过程中, 为了实现高功率的要求, 陆续出现了通过槽加载^[8], 脊加载等提高耦合阻抗来改善性能的研究^[9]; 也有利用多注, 级联, 相速渐变等新型结构来实现大功率的研究^[10], 还有振荡器通过引入漂移段来提高输出功率的研究^[11]. 当行波管的工作频率上升到太赫兹后, 一方面结构尺寸变小对传统机械加工方式提出挑战; 另一方面对于多电子注的结构, 还面临着电子注聚焦的问题. 由于近年来 MEMS 技术的蓬勃发展, LIGA 和 UV-LIGA 等加工方式逐渐成熟, 加工问题得以逐步解决^[12]; 而多电子注的电子光学设计却是一个研究重点和难点. 2007 年, 加拿大的 CPI 公司研制出频率为 220 GHz, 平均输出功率为 6 W 的振荡器^[13]; 2013 年, Northrop Grumman 公司加工出 G 波段的折叠波导行波放大器, 频率为 214 GHz 时输出功率为 55 W, 增益为 28.5 dB^[14]; 2014 年 6 月, 美国海军实验室报道用 UV-LIGA 工艺制作的 220 GHz 折叠波导行波放大器的最新成果, 带宽 15 GHz, 输出功率超过 60 W^[15].

本文提出了一种工作在 G 波段的新颖级联折叠波导高频结构, 该结构由一个折叠波导返波振荡器 (folded waveguide backward oscillator, FW-BWO) 与一个折叠波导行波放大器 (folded waveguide traveling-wave tube amplifier, FW-TWT) 级联, 由 FW-BWO 产生 THz 信号, 再将信号作为下一级放大器的输入信号. 针对该波段的多注级联结构, 整个相互作用长度只有 9.6 mm, 因此可以采用均匀永磁聚焦. 该结构的优点在于: 1) 结构自身产生信号源, 不需要外接 THz 激励源; 2) 作为放大器的输入信号不能过大, 信号稳定即可, 因此, 整个器件结构对 FW-BWO 的要求不高, 易于制造; 3) 对放大器而言, 由于输入信号较大, 所以相互作用长度就大大缩短了, 这对器件的小型化和集成化是很有益的.

1 FW-BWO 激励的 FW-TWT 放大器的设计

对矩形波导而言, 其相位常数为^[16-17]:

$$\beta_{wg} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2} \quad (1)$$

当电磁波经过折叠波导一个周期内所传播的距离 L 后, 其相移为:

$$\beta_{wg}L = \frac{2\pi L}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2} \quad (2)$$

其中, p 为折叠波导的半周期. 相邻间隙会带来 π 的相位跳变, 因此每个周期的相移则为:

$$\beta_{0p} = \beta_{wg}L + \pi = \frac{2\pi L}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2} + \pi \quad (3)$$

β_0 为折叠波导的相位常数, 对 n 次空间谐波而言, 有:

$$\beta_{np} = \beta_{0p} + 2\pi n = \frac{2\pi L}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2} + (2n + 1)\pi \quad (4)$$

若不考虑折叠波导弯曲部分和电子注通道的影响, 波轴向相速可表示为:

$$v_{pn} = \frac{\omega}{\beta_n} = \frac{2\pi c/\lambda}{\beta_n} = \frac{c}{\frac{L}{p} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2} + \frac{(2n + 1)\lambda}{2p}} \quad (5)$$

对于前向基波分量, 即 $n = 0$, 所以上式简化为:

$$v_p = \frac{c}{\frac{L}{p} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2} + \frac{\lambda}{2p}} \quad (6)$$

式(6)即为折叠波导的色散方程, 根据上式可以画出如图 1 所示的色散曲线. 图 1(a) 为 FW-TWT 的色散曲线, 电压为 14.2 kV 时, 其工作频带为 200 ~ 272 GHz, 工作在行波段; 图 1(b) 为 FW-BWO 的色散曲线, 电压为 22 kV 时, 工作频点为 212 GHz, 工作在返波段. 由此可以看出, FW-BWO 是可以激励 FW-TWT 的. 此外, 还可以通过调节 FW-BWO 的工作电压, 来实现不同的工作频点. 只要频点落在 FW-TWT 的工作频带内, 激励就可以实现.

折叠波导结构如图 2 所示, 图中 a 是波导宽边, b 是波导窄边, p 是半周期, h 是直波导的长度, r 是电子束通道半径, r_b 是电子束半径. 结构参数如表 1 所示.

2 粒子模拟研究

首先考虑 FW-BWO 部分, 其周期数为 10, 按照表 1 的结构参数可以得到 58 W 的输出功率, 如图 3 所示, 信号稳定. 将输出信号稳定的 FW-BWO 加入

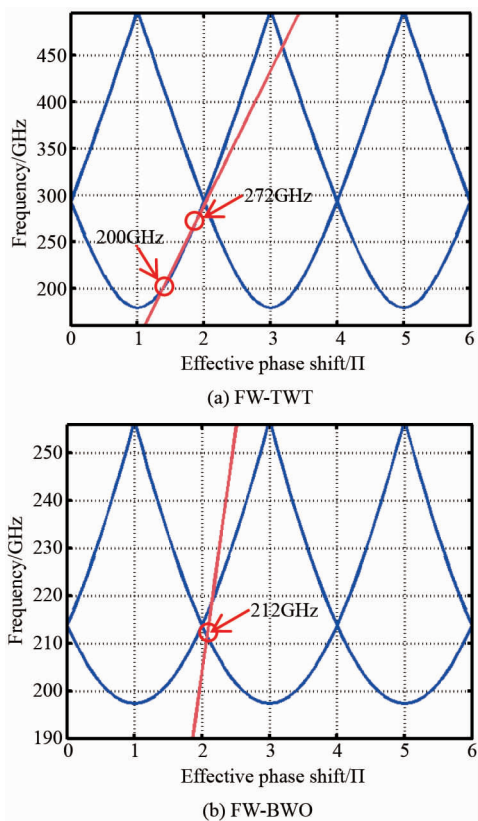


图1 色散曲线图(a)FW-TWT, (b)FW-BWO
Fig.1 The dispersion curve of folded waveguide (a) TWT, (b)FW-BWO

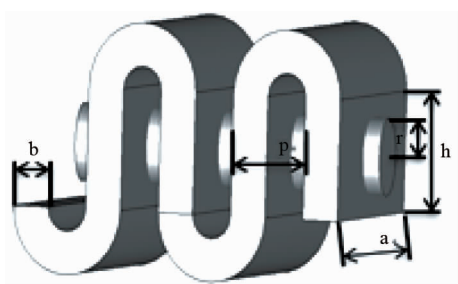


图2 折叠波导的结构及参数示意图
Fig.2 The structure and parameters of folded waveguide

过渡波导部分和放大器部分. 放大器的结构参数如表 1 所示. 同一频率的振荡器和放大器,其结构参数是不同的,因此两部分的波导口尺寸不同,需要设计合理的渐变. 一方面,FW-BWO 的输出功率一般都较大,若放大器的输入信号为几十瓦,必定引起过群聚现象;另一方面,为了方便加工,直接将两个波导口接在一起,形成一个自然衰减器. 为了避免 FW-BWO 的输出信号会激起放大器的噪声,随之形成新的振荡,因此,再利用衰减材料先降低放大器的输入信号,结构设计如图 4(a)所示,端口 1 为 FW-BWO

振荡的输出信号,端口 2 为放大器的输入信号,端口 3 为放大器放大后的信号. 其次,放大器的周期数设为 20 个周期,这是由于输入信号较大,不需要太长的作用长度,另外,20 个周期的放大器长度与 10 个周期的 FW-BWO 长度接近,整个器件的长度小于 1 cm. 这个设计满足器件小型化,集成化的发展趋势.

表 1 振荡器和放大器的结构参数
Table 1 The structure parameters of the FW-BWO and FW-TWT

Parameter	FW-BWO	FW-TWT
a/h	0.63	3.11
b/h	0.17	0.44
p/h	0.33	0.89
r/h	0.17	0.37
r_v/h	0.1	0.3
U	22 kV	14.2 kV
I	0.1 A	0.66

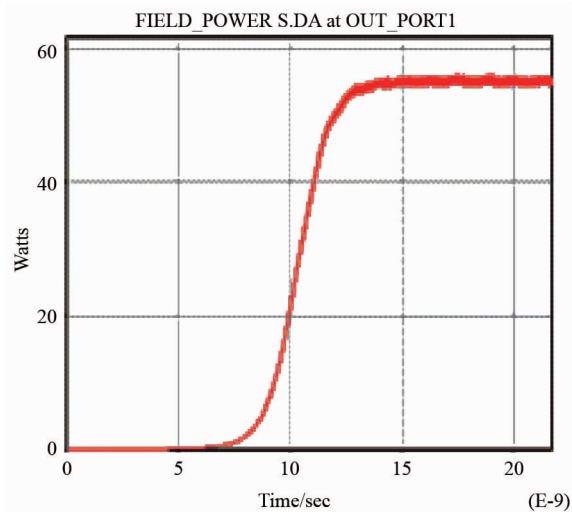


图3 FW-BWO 的振荡平均输出功率图
Fig.3 The average output power of FW-BWO

衰减材料的形状和高度对衰减效果的影响很大,如图 4 所示,是两种不同的衰减材料填充方法,图 4(a)为衰减材料呈三棱锥,完全将波导封闭,(b)是衰减材料呈长方体,高度为 $b/2$. 衰减材料若是将波导完全封闭,则放大器中的信号振荡会加剧,图 5(a)为图 4(a)结构在端口 2 的信号,由图可以看出,端口 2 信号不稳定,产生了振荡;图 5(c)为图 4(b)结构经过端口 2 处的信号,在波导没有被封闭的情况下,放大器部分的振荡大大减弱,因此端口 2 得到了从端口 1 经过衰减材料衰减后的信号,信号非常稳定. (b)、(d)分别为图 4(a)、(b)两种结构在端口 2 处的频谱图. 可以看出,(b)图比(d)图多一个频点 2,而频点 1 为 216 GHz,与所设计的 212

GHz 基本符合. (b)图中频点 1 信号很弱,说明没有得到放大,而多出的频点 2(约为 244 GHz)则是在衰减材料封闭波导时,放大器部分形成了一个振荡器,从而振荡产生的信号. 由此可得,图 4(b)的衰减材料涂覆方式更适合设计要求,所以以下的优化过程会选择(b)结构做进一步研究.

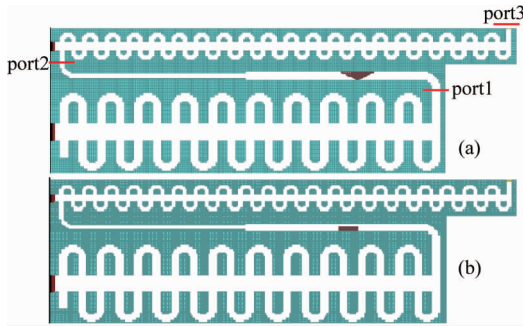


图 4 两种不同衰减材料填充方式的 FW-BWO 驱动 TWT 放大器
Fig. 4 Two different ways of attenuation materials filling

综上所述得出衰减材料不能将波导完全封闭,图 6 是图 4(b)的粒子群聚图以及电子能量图,由图可以看出,振荡器部分和放大器部分粒子群聚都非常好,说明注-波相互作用程度很高.

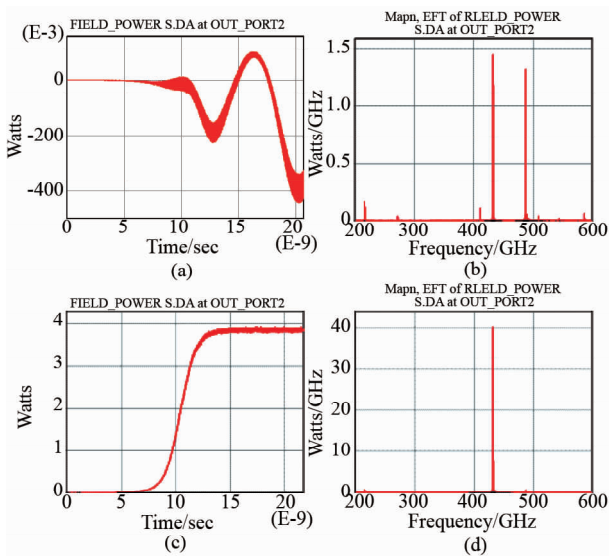


图 5 图 4 两种结构中端口 2 的功率及频谱
Fig. 5 The output power (a), (c) and frequency spectrum (b), (d) of port 2 of the two structures in Fig. 4

3 FW-BWO 激励的 FW-TWT 放大器的性能优化

由上述数据可以看出,这样一个 FW-BWO 激励

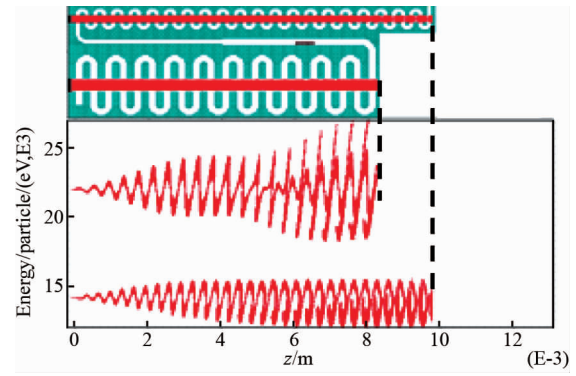


图 6 图 4(b)的粒子群聚图以及粒子能量图
Fig. 6 The particles in the structure and particle energy with structure in Fig. 4(b)

的 TWT,其性能并不优,而且结构上还有衰减材料,衰减材料如何涂覆都是在实际加工中要考虑的问题. 事实证明,衰减材料对整个输出功率的影响特别大,因此首先优化衰减材料的高度和长度. 如图 7 所示,衰减材料越长,信号衰减越厉害,FW-BWO 的振荡也越强. 但会导致放大器的输入信号减弱,输出信号也减弱. 当衰减材料的长度为 0.4 mm 时,放大器的输出功率最大. 图 8 中,当衰减材料的高度逐渐增加,FW-BWO 的振荡减弱,信号衰减越强,当高度为 0.02 mm 时,放大器的输入信号为 18 W 左右,输出信号可以达到 88 W. 由以上两个图可以看出,当衰减材料体积较小,即对信号的衰减程度较低时,得到的放大器输入信号越大,放大器最终的输出信号也就越大.

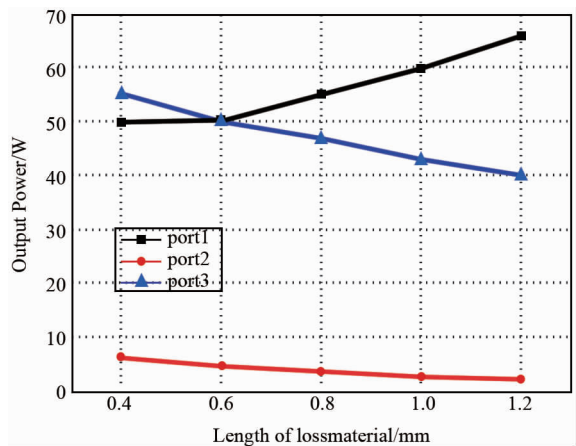


图 7 三个端口的功率随衰减材料长度的变化
Fig. 7 The output power of the three ports versus the length of attenuation material

以上优化数据中,所有参数结构的最终输出信号,其工作频点都在 216 GHz. 可以看出,放大器的

输入功率越来越大,并没有激起对放大器本身的振荡,反而由于较大的功率输入,抑制了放大器的噪声振荡.因此,为了更简化结构,降低结构的制造难度,将衰减材料去掉,直接将振荡器与放大器连接在一起,直接用较大的功率输入.

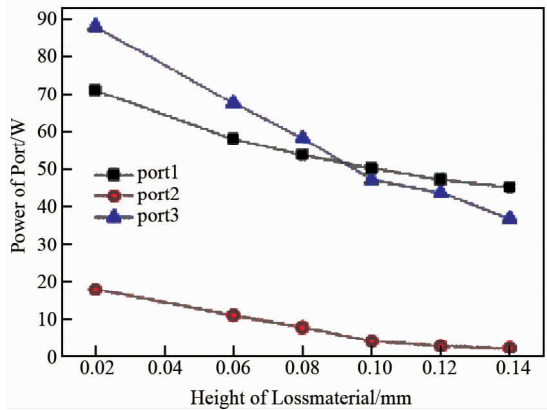


图8 三个端口的功率随衰减材料高度的变化

Fig. 8 The output power of the three ports versus the height of attenuation material

在没有衰减材料,参数相同的情况下,FW-BWO的输出信号只经过无渐变的波导口自然衰减后作为放大器的输入信号.最终得到在同样的结构参数和阴极参数下,结构的三个波导口的信号如图9所示,可以看到三个波导口的信号非常稳定,FW-BWO的振荡输出信号为78 W,经过两种波导过渡的自然衰减,得到了一个近20 W的放大器输入信号.经过放大器的工作,最终实现了96 W的输出功率.

在阴极电流不同的情况下,各个端口的输出信号依然稳定,频点也在216 GHz,图10为不同阴极电流时,结构各个端口的功率.

另一方面,可以通过改变振荡器的阴极电压,来实现不同的频点振荡,如图11为不同阴极电压下,振荡器的频谱图.可以看出,当振荡器的阴极电压增大时,其振荡的频率点变低,这与振荡器的色散曲线图1(b)是相吻合的,当电压变大时,电压线与色散曲线的交点降低,频点降低.

4 非线性理论计算与模拟结果比较

对于该结构中的放大器部分,其输入功率较大,直接影响着输出功率的大小和稳定.因此从理论和仿真模拟上来分析其输入信号和输出信号的关系.

根据非线性理论,折叠波导第 k 个周期中电子对波所做的总功为^[18-19]:

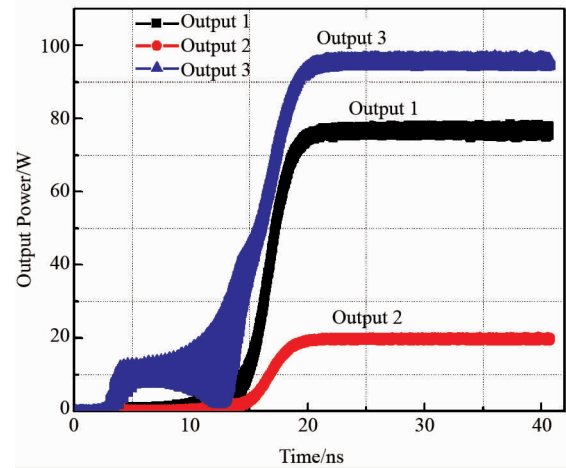


图9 无衰减材料的情况下,三个端口的功率大小

Fig. 9 The output power of the three ports without attenuation material

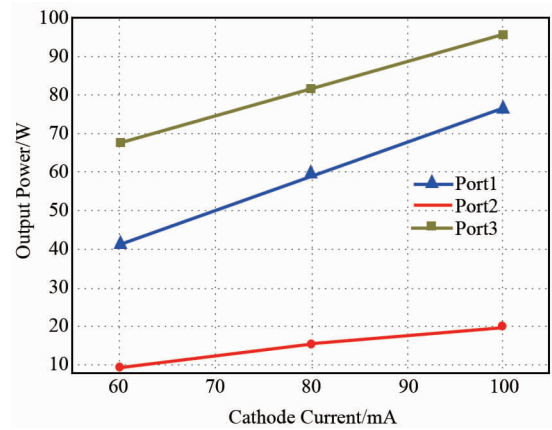


图10 无衰减材料的结构,振荡器阴极电流与各端口饱和功率的关系

Fig. 10 The saturated output power of the three ports versus cathode current of FW-BWO without attenuation material

$$P_{b,k} = \frac{I_0}{2\pi} \int_{-p/2}^{p/2} \text{Re} \left\{ \left[\widehat{V}_{FG(k)} Q_{n,k} + \widehat{V}_{BG(k)} Q_{n,k}^* \right] \cdot \left[\int_0^{2\pi} \exp(i\varphi_{0,n,k}) d\varphi_0 \right] \right\} dz \quad (7)$$

第 k 个周期中电子对波做的总功为:

$$P_{f,k} = \frac{1}{2Z_c} \left[(\widehat{V}_{F(k)} + \Delta\widehat{V}_{F(k)})^2 - \widehat{V}_{F(k)}^2 + (\widehat{V}_{B(k)} + \widehat{V}_{B(k)})^2 - \widehat{V}_{B(k)}^2 \right] \quad (8)$$

以上两式中, Z_c 为波导特性阻抗, I_0 为阴极电流, $\widehat{V}_{FG(k)}$ 和 $\widehat{V}_{F(k)}$ 分别为第 k 个周期中前向波在间隙处的电压和波导中的电压; $\widehat{V}_{BG(k)}$ 和 $\widehat{V}_{B(k)}$ 分别为第 k 个周期中返波在间隙处的电压和波导中的电压;

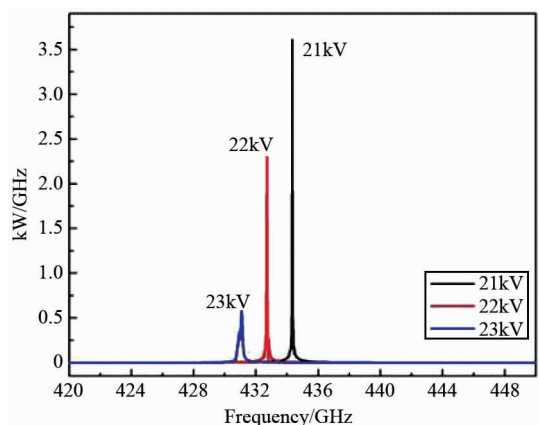


图 11 无衰减材料的结构,振荡器阴极电压对工作频点的影响

Fig. 11 The working frequency versus cathode voltage of FW-BWO without attenuation material

$\Delta \hat{V}_{F(k)}$ 和 $\Delta \hat{V}_{B(k)}$ 分别为注一波相互作用后前向波和返波的电压增量;其中:

$$Q_{n,k} = \frac{\xi}{p \sinh(\xi l_c)} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{C_m I_1(\gamma_m r_b)}{\gamma_m r_b I_0(\gamma_m r_c)} \cdot \frac{\sin(\beta_m l_d / 2)}{\beta_m l_d / 2} \times \exp(-i\beta_m z) \cdot \exp[-i\beta_0(k-1)p]$$

$$C_m = \frac{2}{\xi^2 + \beta_m^2} [\xi \sinh(\xi l_c) + \beta_m \cos(\xi l_c) \sin(\beta_m l_c)]$$

$$\gamma_m = \sqrt{\beta_m^2 - \omega^2 / c^2} \quad (9)$$

式(9)中, $I_{0,1}$ 为修正贝塞尔函数, β_0 是基波在慢波结构中的相位传播常数, p 为折叠波导结构的半周期, l_d 是电荷圆盘模型中圆盘的厚度, $l_c = b/2$; ξ 为场形系数, β_m 为 m 次空间谐波的相位传播常数. 由能量守恒, $P_{f,k} = P_{b,k}$, 可推出:

$$\Delta \hat{V}_{F(k)} = \frac{I_0 Z_c}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} Q_{n,k}^* \left[\int_0^{2\pi} \exp(-i\varphi_{0,n,k}) d\varphi_0 \right] dz \quad (10)$$

至此,可以计算出非线性理论下,折叠波导行波放大器的输出功率. 图 12 中红色线为非线性理论的计算结果. 黑色线为 MAGIC 的仿真结果,两者结果基本相符. 由图可知,对一个放大器而言,输入功率的大小与输出功率之间为非线性关系. 输入信号越来越大时,电子受到的场就越大,电子会在更短的作用距离内群聚,对于同样长度的器件,输入信号越大,越易形成过群聚,因此,当放大器的输入信号越大,放大器的增益反而降低. 这个结论对以后设计级联结构具有指导意义.

5 结论

对返波激励行波放大的折叠波导行波放大器进

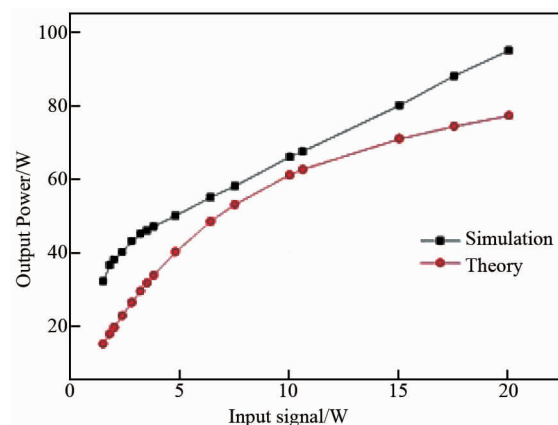


图 12 放大器的输入信号与输出信号的关系

Fig. 12 The output power versus input power of TWT with simulation and theory

行了深入的理论分析与粒子模拟研究,研究结果表明,与单独的 TWT 相比,该结构解决了源的问题;与单独的 FW-BWO 相比,能得到更大的输出功率. 该结构中,若放大器与振荡器没有实现信号连通,那么放大器自身会作为一个振荡器振荡出频点为 244 GHz 的信号. 衰减材料的优化表明了放大器的输入信号大小会对放大器的性能产生很大影响. 没有衰减材料的结构中,两个不同尺寸的波导口形成自然的衰减器,比衰减材料更具实际意义. 研究成果对发展紧凑型、集成化的新型真空太赫兹源具有重要的参考意义.

References

- [1] FENG Jin-Jun, CAI Jun, HU Yin-Fu, *et al.* THz vacuum electronics evices using folded wave guide slow wave structure[J]. *Journal of CAEIT*(冯进军,蔡军,胡银富,等,折叠波导慢波结构太赫兹真空器件研究. *中国电子科学研究院学报*). 2009, 4(3): 249 - 254.
- [2] ZHANG Zhang. Research progress of THz traveling wave tubes[J]. *Laser & Infrared*(张章. 太赫兹行波管的研究进展激光与红外, *激光与红外*). 2012, 42(4): 250 - 257.
- [3] LIU Shun-Kang, ZHOU Cai-Yu, BAO Zheng-Qiang. A new type of millimeter wave high power devices-folded waveguide TWTs[J]. *Journal of Electron Devices*(刘顺康,周彩玉,包正强. 新型毫米波大功率器件—折叠波导行波管, *电子器件*). 2001, 24(2): 158 - 161.
- [4] CAI Jun. FWG slow-wave structure at W band[D]. Shandong University(蔡军. W 波段折叠波导慢波结构的研究, 山东大学)2006, 50 - 56.
- [5] YANG De-Xin. New pattern slow-wave structure at W band [D]. University of Electronic Science and Technology of China(杨德欣. W 波段新型慢波结构的研究, 电子科技大学), 2015.
- [6] HE Jun, WEI YAN-Yu, GONG Yu-Bin, *et al.* Linear theory of the beam-wave interaction in a ridge-loaded folded slow-wave structure[J]. *ACTA PHYSICA SINICA*(何俊,魏彦

玉,宫玉彬,等.脊加载曲折波导行波管注波相互作用的线性理论研究.《物理学报》.2010,59(9):6659-6665.

- [7] PENG Bo, HE Jun, HUANG Ming-Guang, et al. Investigation of W-band diverse-shaped groove-loaded folded waveguide traveling-wave tubes [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*. (彭博,何俊,黄明光,等. W 波段多种槽加载折叠波导行波管的研究.《电子与信息学报》).2012,34(7):1760-1766.
- [8] Li K, Liu W X, Wang Y, et al. Dispersion characteristics of two-beam folded waveguide for terahertz radiation [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2013, 60:4252-4257.
- [9] YAN Sheng-Mei, SU Wei, WANG Ya-Jun, et al. Theoretical analysis and numerical simulation of parallel multi-beam THz folded waveguide traveling-wave tube [J]. *High Power Laser And Particle Beams* (颜胜美,苏伟,王亚军,等.并行多注 THz 折叠波导行波管的理论分析与数值模拟.《强激光与粒子束》).2014,26(8):083105-1-6.
- [10] ZHANG Fang, DONG Zhi-Wei, DONG Ye. Simulation of 140GHz multi-beam folded waveguide traveling-wave tube [J]. *High Power Laser And Particle Beams* (张芳,董志伟,董焯.140GHz 多束折叠波导行波管仿真分析.《强激光与粒子束》)2012, 24(4):989-992.
- [11] GAO Yun-Yun, LIU Wen-Xin, WANG Yong, et al. Beam-wave interaction of multi-section folded waveguide high-frequency structure for terahertz extended interaction oscillator [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology* (高云云,刘文鑫,王勇,等. THz 扩展相互作用振荡器的多段式折叠波导高频结构注波相互作用分析.《真空科学与技术学报》).2015,35(9):1069-1074.
- [12] Liu W X, Zhao C, Li K, et al. Two-section folded-

(上接 434 页)

波段进行抑制的解决方案,利用精密掩模、多次成膜技术,研制出工作波段覆盖 0.4~2.5 μm 的消高级次光谱集成滤光片样品.测试结果表明滤光片在工作波段透过率达到 93%,带外抑制达到 OD3,过渡区域控制在 30 μm 以内,通过了航天用光学薄膜产品可靠性试验.随着超光谱成像技术发展,消高级次光谱集成滤光片技术将进一步向紫外和中长波红外波段拓展.

References

- [1] Prieto-Blanco X, Montero-Orille C, COUCE B, et al. Analytical design of an Offner imaging spectrometer [J]. *Opt. Express*, 2006, 14(20):9156-9168.
- [2] Rowlands N, NEVILLE R A, POWELL I P. Short-wave infrared imaging spectrometer for remote sensing [J]. *SPIE*, 1994, 2269:237-247.
- [3] Lucke R L. Out-of-plane dispersion in an Offner spectrometer [J]. *Opt. Engng.*, 2007, 46(7):073004.
- [4] Johnson W R, Wilson D W, Bearman G. All-reflective snapshot hyperspectral imager for ultraviolet and infrared applications [J]. *Opt. Lett.*, 2005, 30(12):1464-1466.
- [5] ZHENG Yu-Quan. Design of compact Offner spectral imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering* (郑玉权.小型 Offner 光谱成像系统的设计.《光学精密工程》),

waveguide slow-wave structure for terahertz extended interaction oscillator [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2014, 61(3):902-908.

- [13] WU Zhen-Hua. Terahertz EIO theory and experiment [D]. University of Electronic Science and Technology of China (吴振华,太赫兹 EIO 的理论和实验研究,电子科技大学),2010.
- [14] Kreischer K E, Tucek J C, Basten M A, et al. 220 GHz power amplifier testing at northrop grumman [J]. *IEEE*, 2013, 1-2.
- [15] Joye G D, Cook A M, Calame J P, et al. Demonstration of a high power, wideband 220-GHz traveling wave amplifier fabricated by UV-LIGA [J]. 2014, 61(6), 1672-1678.
- [16] LIU Shun-Kang, ZHOU Cai-Yu, BAO Zheng-Qiang. Propagating Characters for Folded Waveguide Slow Wave Circuit [J]. *VACUUM ELECTRONICS* (刘顺康,周彩玉,包正强.折叠波导慢波电路的传输特性.《真空电子技术》)2002,39(4):39-43.
- [17] WANG Shu-Jian, XUE Qian-Zhong, WANG Zi-Cheng, et al. Improvements of two-beam ka band folded waveguide of traveling wave tube [J]. *Chinese Journal Of Vacuum Science And Technology* (王书见,薛谦忠,王自成,等. Ka 波段双注折叠波导行波管的研究.《真空科学与技术学报》).2014,34(1):43-48.
- [18] Li K, Liu W X, Wang Y, et al. A nonlinear analysis of the terahertz serpentine waveguide traveling-wave amplifier [J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22:043115-1-9.
- [19] LIU Sheng-Gang. *Introduction to microwave electronics* [M]. National Defence Industry Press (刘盛纲,《微波电子学导论》.国防工业出版社).1983:351.

2005,13(6):650-657.

- [6] TONG Ya-Jun, WU Gang, ZHOU Quan, et al. Design method of Offner-Type imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica* (佟亚军,吴刚,周全,等. Offner 成像光谱仪的设计.《光学学报》),2010, 30(4):1148-1152.
- [7] LAN Wei-Hua, WANG Xin, LIU Yin-Nian, et al. The convex grating diffractive efficiency calculating and second diffraction suppression [J]. *Infrared Technology* (兰卫华,王欣,刘银年,等.凸面光栅的衍射效率计算及其二级光谱抑制.《红外技术》),2009,31:256-258.
- [8] HUANG Yuan-Shen, CHEN Nan-Shu, ZHANG Da-Wei, et al. Design method for Offner imaging spectrometer composed of convex grating [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument* (黄元申,陈南曙,张大伟,等.一种凸面光栅 Offner 结构成像光谱仪的设计方法.《仪器仪表学报》),2005, 29(6):1236-1239.
- [9] YIN Xin, LIU Ding-Quan, DUAN Wei-Bo, et al. Design and fabrication of near-infrared dichroic beam-splitter for polarization state coding [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (尹欣,刘定权,段微波,等.近红外波段偏振编码用分色片的设计与研制.《红外与毫米波学报》),2012,31(6):505-509.
- [10] Macleod H A. *Thin-film optical filters* [M], Thin Film Center Inc. Tucson, Arizona, 1999:257-345.
- [11] ZHONGg Di-Sheng. *Vacuum deposition* [M]. Press of Liaoning University (钟迪生.《真空镀膜》[M].辽宁大学出版社),2001:42-48.
- [12] Shao-wei Wang, Ding-quan Liu, Xiao-shuang Chen, et al. Realization of integrated narrow bandpass filters in the infrared region [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. 2004, 25(11):1677-1683.