

太赫兹折叠波导行波管再生反馈振荡器 非线性理论与模拟*

高 鹏^{1)†} John H Booske²⁾ 杨中海³⁾ 李 斌³⁾ 徐 立³⁾ 何 俊³⁾ 官玉彬³⁾ 田 忠¹⁾

1) (电子科技大学电子科学技术研究院, 成都 610054)

2) (Department of Electrical and Computer Engineering, University of Wisconsin, Madison 53706, USA)

3) (电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

(2010 年 1 月 14 日收到; 2010 年 8 月 15 日收到修改稿)

行波管再生反馈振荡器是一种新型太赫兹源器件. 基于 560 GHz 折叠波导慢波结构, 对此类器件的工作原理与物理模型进行分析阐述. 采用非线性相互作用模型对行波管再生反馈振荡器进行详细振荡过程模拟. 模拟结果显示, 在 550—600 GHz 频率下可以获得稳态振荡频率, 并在 560 GHz 处获得最大单频输出功率. 结果同时表明, 振荡频率随电子注电压发生跳变现象, 并简要分析了其产生原因.

关键词: 太赫兹源, 行波管, 振荡器, 折叠波导

PACC: 4110H, 9420R

1. 引 言

太赫兹频段 (300—3000 GHz) 的电磁波在通信、宇航、安全、医学成像、生物化学以及制造等行业中具有非常广阔的应用前景^[1]. 如何得到稳定可靠、高效高能以及成本并不高昂的太赫兹辐射源, 一直是太赫兹领域中热门的研究课题之一. 由于目前太赫兹辐射源相对匮乏, 因而电真空器件又重新得到了前所未有的重视和发展^[2].

诞生于 20 世纪 40 年代的行波管放大器, 在雷达通信和电子战中一直发挥着重要的作用^[3]. 采用折叠波导作为慢波结构的行波管可以在高达 700 GHz 的频率上对信号进行放大, 并且可以提供高于数十瓦的连续波饱和输出功率以及高于 50 dB 的增益, 带宽可以达到^[4] 30%. 近年来, 行波管再生反馈振荡器已经被证明是非常优秀的太赫兹源器件之一. 由美国 Northrop Grumman 公司研制并生产的太赫兹折叠波导行波管再生反馈振荡器, 可以提供稳定的 607—675 GHz 频率信号输出, 并且在 656 GHz 频率上可以达到 50 mW 的最大输出功率, 电子效率达到^[5] 0.45%. 此类器件是将含有衰减器 (或者由

反馈回路的损耗等效为衰减器) 的正反馈电路接在行波管放大器慢波结构的输出端与输入端之间, 通过振荡将电子注的噪声放大并输出一定频率的信号. 通过调节反馈回路的衰减与相移, 可以得到稳态的单频、多频以及混沌现象^[6].

本文详细分析了此类器件的物理模型和工作原理, 采用非线性注波相互作用模型, 以 560 GHz 折叠波导行波管放大器^[7] 为例对行波管再生反馈振荡器进行非线性模拟, 模拟结果表明, 在 550—580 GHz 频率范围内均有单频输出信号, 并在 560 GHz 频率附近获得最大输出功率信号. 同时还表明, 振荡频率随电子注电压变化发生明显跳变现象.

2. 物理模型

行波管再生反馈振荡器的物理模型如图 1 所示. 最初电子注噪声 (入射噪声) 信号进入行波管放大器的输入端, 被放大后在输出端经过反馈回路的衰减作为反馈信号, 与新的电子注噪声信号叠加后重新进入行波管放大器的输入端, 以此循环振荡得到与行波管放大器的饱和功率相关的输出信号.

* 电子科技大学青年基金 (批准号: L08010401JX0736) 和国家自然科学基金 (批准号: 10905008) 资助的课题.

† E-mail: gaopeng82@uestc.edu.cn

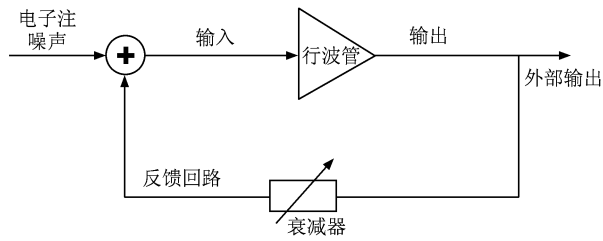


图1 行波管再生反馈振荡器的物理模型

2.1. 入射噪声

入射噪声 (shot noise) 的模拟可以拆分为功率和相位. 这里认为入射噪声主要是由电子注引起^[8], 入射噪声功率 P_{SN} 可表示为^[9]

$$P_{SN} = 2I_0 q \Delta f. \quad (1)$$

这里 I_0 为电子注直流电流, q 为电子电量, Δf 为工作频域内的临近频率差值, 满足 $f_N = f_{\min} + N\Delta f$, 其中 f_{\min} 为工作带宽的最小频率, N 为整数.

在实际的模拟中, 入射噪声在每次回路中的出现都可以认为是完全随机的, 变化区间为 $[0, 2\pi]$.

2.2. 反馈信号和输入信号的叠加

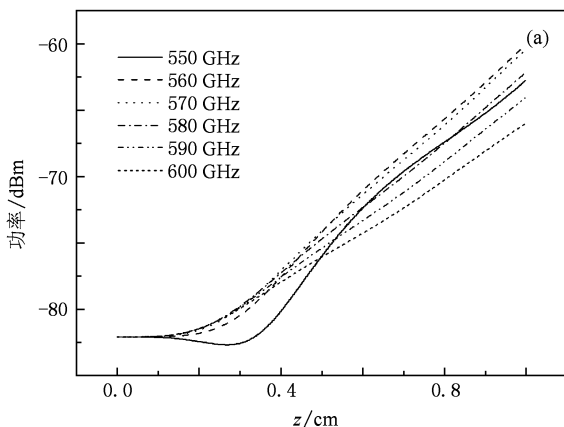
反馈信号的相移主要由反馈回路的长度和信号的传输速度决定. 这里假设在反馈回路中不存在色散现象, 信号的传输速度为光速. 这样, 信号在反馈回路中的相移 $\Delta\varphi_{fb}$ 可以表示为

$$\Delta\varphi_{fb}(\omega) = \omega l_{fb} / c, \quad (2)$$

其中 l_{fb} 为反馈回路的长度, c 为光速. 每次整体回路的相移 $\Delta\varphi_n$ 为行波管放大器中的相移 $\Delta\varphi_{lwt}$ 与反馈回路中的相移 $\Delta\varphi_{fb}$ 之和, 即

$$\Delta\varphi_n(\omega) = \Delta\varphi_{lwt}(\omega) + \Delta\varphi_{fb}(\omega). \quad (3)$$

由传输线理论可知, 第 n 次回路的反馈信号和



入射噪声的叠加, 即第 $n+1$ 次回路的输入信号强度 $V_{in}^{(n+1)}$ 可以表示为

$$V_{in}^{(n+1)}(\omega) = V_{fb}^{(n)}(\omega) + V_{noise}^{(n)}(\omega), \quad (4)$$

其中 $V_{fb}^{(n)}$ 和 $V_{noise}^{(n)}$ 分别是第 n 次回路的反馈信号强度和噪声信号强度. 需要特别说明的是, 在模拟过程中可以发现, 随着回路数量的增加, 入射噪声信号的强度对整体回路的影响在逐步减弱, 这说明反馈回路信号在逐步取代入射噪声信号作为下一次回路的输入信号.

2.3. 折叠波导结构

折叠波导的慢波特性和参量利用 HFSS 软件计算. 表 1 列出了 560 GHz 折叠波导慢波结构的具体结构参量取值, 其中参量符号的意义如图 2 所示.

表1 560 GHz 折叠波导慢波结构参量取值

参量	取值/mm
a	0.300
b	0.043
L	0.320
R_{avg}	0.033
r	0.010
p	0.066

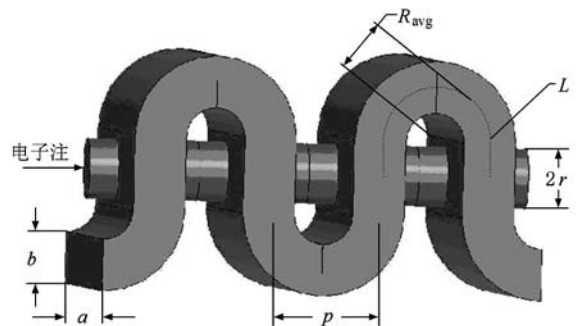


图2 折叠波导结构示意图

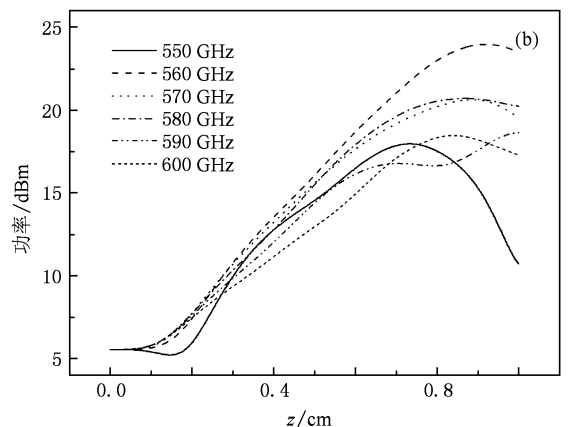


图3 560 GHz 折叠波导行波放大器在 10.9 kV 时不同频率下的注波相互作用模拟计算结果. 横坐标 z 为行波管轴向位置. (a) 小信号增益, (b) 饱和增益

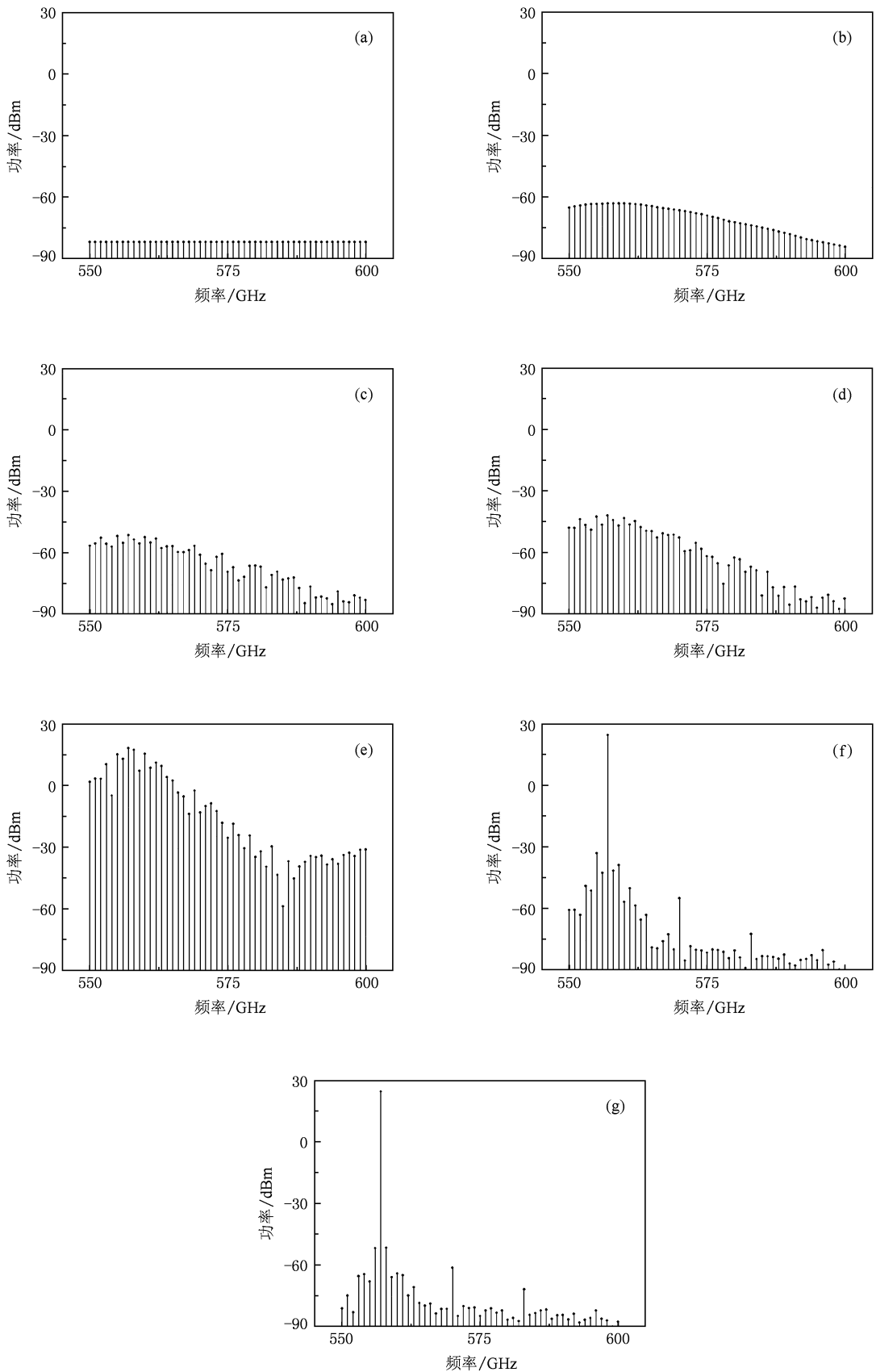


图4 560 GHz 折叠波导管波管振荡器在电压为 10.9 kV 时的振荡过程模拟计算结果 (a) 第0次回路, (b) 第1次回路, (c) 第2次回路, (d) 第3次回路, (e) 第10次回路, (f) 第50次回路, (g) 第100次回路

2.4. 非线性注波互作用

对于 560 GHz 折叠波导行波管放大器的注波互作用模拟, 将表 1 中所给出的慢波结构的参量值代入非线性多频工作方程组中^[10], 可以获得定性而可靠的输出功率和增益.

图 3 给出了非线性互作用模拟的一些计算结果. 图 3(a) 为 560 GHz 折叠波导慢波结构在 10.9 kV、互作用区域长度为 1 cm 时的多个频率小信号增益对比, 图 3(b) 为在 10.9 kV 时的多个频率饱和增益对比, 频率区间为 550—580 GHz, 对应的电子注电流为 0.5 mA.

通过图 3 可以看出, 在工作频率为 550—600 GHz 范围内, 该放大器的小信号增益在 20—25 dB. 在约为 20 dB 的饱和增益对应饱和功率为 50—200 mW, 并在 560 GHz 频率上输出达到了峰值功率 (263 mW).

3. 560 GHz 行波管再生反馈振荡器的模拟结果

3.1. 振荡过程

560 GHz 折叠波导行波管再生反馈振荡器在 10.9 kV 下的振荡过程模拟示例如图 4 所示. 从图 4(a) 可以看出: 在最初 (第 0 次回路) 时, 系统并无反馈信号可以叠加. 由于没有其他信号输入源, 整个行波放大电路的输入信号完全来自于电子注噪声, 其功率由 (1) 式确定.

电子注噪声信号经过行波放大电路进行放大后, 第 1 次回路的输出功率频谱如图 4(b) 所示. 此时, 所有被放大的信号 (噪声) 在此频谱区域所获得的增益均为小信号增益. 第 1 次回路的放大结果, 即慢波结构的输出信号经过反馈回路的衰减器 (或回路本身的损耗) 衰减后, 与一直存在的电子注噪声信号重新叠加后进入慢波结构与电子注进行作用后获得放大, 被放大的信号可认为是第 2 次回路的输出信号. 此例中第 2 次回路的放大过程仍为线性过程 (输出增益为小信号增益), 其结果如图 4(c) 所示.

如此经过循环振荡, 第 3 次、第 10 次、第 50 次以及第 100 次回路的结果分别如图 4(d), (e), (f), (g) 所示. 这里需要指出, 该行波放大结构在输入功

率达到一定程度后 (此例中为第 10 次回路), 在工作频谱内一部分信号的放大增益开始变为饱和增益, 其增益值在逐步变小; 但同时在工作频谱内会存在部分信号的增益保持不变 (仍为小信号增益), 而最终饱和功率超过了最初回路的最大小信号增益的信号. 这说明, 最初小信号增益最高的工作频率点并不一定最终会成为振荡频率, 这已在详细的起振过程实验中也得到了验证^[11].

通过图 4 也可以看出, 在模拟计算至第 50 次和第 100 次回路的结果对比中, 对于振荡频率及其功率的预测并无明显差别. 因此可以认为, 在不需要得到更为详尽的工作频谱内其他非振荡频率的信息时, 对于第 50 次回路的振荡频率模拟已经比较可信. 此时也可以认为此振荡器的振荡频率和输出功率趋于稳态.

3.2. 振荡频率跳变现象

图 5 给出了由折叠波导结构决定的行波管再生反馈振荡器的工作电压范围内振荡频率与工作电压的关系. 从图 5 可以看出, 在 10.7—10.8, 10.9—11.2 及 11.25—11.5 kV 的电压区间中, 振荡频率存在明显的跳变现象. 在实际的实验中我们也发现并验证^[12], 这一跳变现象对于行波管再生反馈振荡器是普适的, 与工作频率范围或慢波结构的材料无关. 产生跳变的原因是振荡频率需要满足总回路 (前向放大与反馈回路之和) 的相位变化为 2π 的整数倍, 并且振荡频率在慢波结构中的小信号增益 G_{ss} 必须大于反馈回路的损耗. 满足此相位和增益 (振荡) 条件的工作频率信号, 其小信号增益随电子注电压的改变而发生变化, 当其上升或者下降至一定值后, 会迁移至临近的满足振荡条件的频率点上,

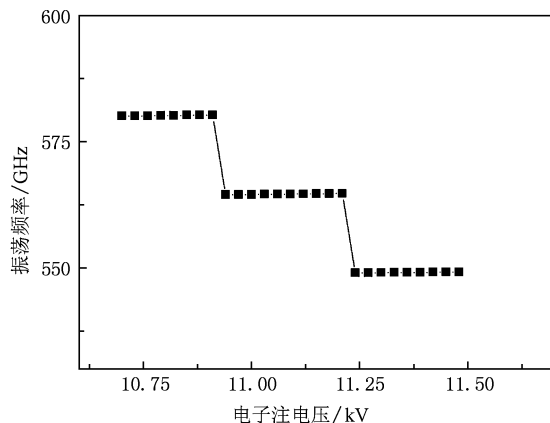


图 5 行波管再生反馈振荡器的振荡频率随电压跳变

从而发生跳变^[13].

4. 结 论

本文对一种新型的太赫兹辐射源器件——行波管再生反馈振荡器的物理模型进行了详细的分析和讨论. 对 560 GHz 折叠波导行波管再生反馈振

荡器进行了模拟, 在 560 GHz 频率获得了稳态的单频最大输出信号, 这和文献[7]的预测相一致. 结果同时表明, 振荡频率随电压发生跳变, 这与实验中观测的结果相似. 因此, 可以说明模拟的结果是较为可信的. 本文的工作对太赫兹折叠波导行波管再生反馈振荡器的研制具有一定的指导意义.

-
- [1] Liu S G, Zhong R B 2009 *J. Univ. Electron. Sci. Technol. China* **38** 481 (in Chinese) [刘盛纲、钟任斌 2009 电子科技大学学报 **38** 481]
- [2] Booske J H 2008 *Phys. Plasmas* **15** 055502
- [3] Barker R J, Booske J H, Luhmann N C Jr, Nusinovich G S 2005 *Modern Microwave and Millimeter-Wave Power Electronics* (New York: Wiley/IEEE).
- [4] Booske J H, Converse M C, Kory C L, Chevalier C T, Gallagher D A, Kreischer K E, Heinen V O, Bhattacharjee S 2005 *IEEE Trans. Electron Dev.* **52** 685
- [5] Kreischer K E, Tucek J C, Gallagher D A, Mihailovich R E 2008 *IEEE International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics* (Piscataway: IEEE) p1
- [6] Marchewka C, Larsen P, Bhattacharjee S, Booske J H, Sengele S, Ryskin N M, Titov V N 2006 *Phys. Plasmas* **13** 013104
- [7] Bhattacharjee S, Booske J H, Kory C L, van der Weide D W, Limbach S, Gallagher S, Welter J D, Lopez M R, Gilgenbach R M, Ives R L, Read M E, Divan R, Mancini D C 2004 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **32** 1002
- [8] Antonsen T M Jr, Manheimer W M 1998 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **26** 444
- [9] Mallinson J C 2004 *IEEE Trans. Magn.* **40** 3407
- [10] Gao P, Yang Z H, Li B, Li J Q, Hu Y L, Zhu X F, Liao L 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **19** 459 (in Chinese) [高鹏、杨中海、李斌、李建清、胡玉禄、朱小芳、廖莉 2007 强激光与粒子束 **19** 459]
- [11] Gao P, Booske J H, Yang Z H 2010 *IEEE International Vacuum Electronics Conference* (Piscataway: IEEE) pp321—322
- [12] Gao P, Booske J H 2009 *IEEE International Conference on Plasma Science* (Piscataway: IEEE) p5227423
- [13] Gao P, Booske J H, Yang Z H 2010 *IEEE Trans. Electron Dev.* **57** 1152

Physics and simulation of terahertz folded waveguide traveling wave tube regenerative feedback oscillators *

Gao Peng^{1)†} John H Booske²⁾ Yang Zhong-Hai³⁾ Li Bin³⁾ Xu Li³⁾
He Jun³⁾ Gong Yu-Bin³⁾ Tian Zhong¹⁾

1) (*Research Institute of Electronic Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*)

2) (*Department of Electrical and Computer Engineering, University of Wisconsin, Madison 53706, USA*)

3) (*School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*)

(Received 14 January 2010; revised manuscript received 15 August 2010)

Abstract

Traveling wave tube (TWT) regenerative feedback oscillators have been demonstrated to be very attractive terahertz source devices. The principle and the physical model of this kind of device are analyzed. To see more detailed oscillation process, a 560 GHz folded waveguide TWT oscillator is presented. The results show steady-state oscillation frequencies exist between 550—600 GHz, and a single-frequency oscillation is found near 560 GHz. An oscillation frequency step-tuning behavior with the continuous variation of the beam voltage is discussed.

Keywords: terahertz source, traveling wave tubes, oscillator, folded waveguide

PACC: 4110H, 9420R

* Project supported by the Youth Foundation of University of Electronic Science and Technology of China (Grant No. L08010401JX0736) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10905008).

† E-mail: gaopeng82@uestc.edu.cn