

文章编号: 2095-4980(2017)04-0543-05

改善效率的 0.14 THz 折叠波导慢波结构设计

雷文强, 蒋 艺, 周泉丰, 胡 鹏, 马国武, 陈洪斌

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 在研究0.14 THz折叠波导行波管中, 提出一种三段相速跳变的设计, 使得电子能够在输出段与行波场发生速度再同步, 从而提高了电子工作效率。根据色散公式, 找到一种影响相速变化的结构因素。通过优化设计进行大信号程序计算, 在电压14.95 kV、工作电流30 mA时, 与未采用相速变化的结构相比, 140 GHz时功率提高了0.84 W, 效率提高了9.13%; 在142 GHz时功率提高了0.88 W, 效率提高了10.4%; -1 dB带宽由原来的5 GHz提高到7 GHz, 扩展了行波管的带宽, 提高了电子与波的相互作用效率。

关键词: 0.14 THz 折叠波导行波管; 三段相速跳变; 速度再同步; 色散分析; 大信号程序计算
中图分类号: TN124 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201704.0543

Efficiency improvement design of 0.14 THz folded waveguide slow wave structure

LEI Wenqiang, JIANG Yi, ZHOU Quanfeng, HU Peng, MA Guowu, CHEN Hongbing
(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: The design of three sections phase velocity taper is put forward in 0.14 THz folded waveguide Traveling Wave Tubes(TWT) research. It can maintain beam-traveling wave velocity synchronization again in output section of interaction circuit and improve the beam operating efficiency. A structure parameter impacting on phase velocity change is found and optimized by slow wave structure dispersion equation. After optimizing design, a large signal program calculation is performed under operating voltage 14.95 kV and current 30 mA. Compared with the structure without phase velocity taper, the efficiency is improved by 9.13% in 140 GHz, and the output power is improved by 0.84 W. The efficiency is improved by 10.4% in 142 GHz, and the output power is improved by 0.88 W. -1 dB bandwidth is improved to 7 GHz from 5 GHz. The design improves the bandwidth and beam-traveling wave work efficiency in D band folded waveguide traveling wave tubes.

Keywords: 0.14 THz folded waveguide Traveling Wave Tubes; three sections phase velocity taper; velocity synchronization; dispersion analysis; large signal program calculation

在高于 100 GHz 的微电真空放大器中, 折叠波导行波管由于其慢波结构具有全金属结构、色散较平坦、高频损耗小、功率容量大等特点, 将在今后的无线通信、光谱学、生物医学等领域有着广泛的应用前景^[1-4]。带宽和效率是行波管设计的重要指标, 目前系统需求对体积和质量越来越严格, 在空间大小、电源功耗等受限制条件下, 只能通过提高电子相互作用效率来实现。当在 100 GHz 以上的高段频率工作时, 由于慢波相互作用耦合阻抗的降低和损耗的增加, 导致电子效率会降低。因此如何提高电子相互作用效率是设计高效率大功率宽带行波管的研究热点问题^[5-6]。本文在 0.14 THz 频段折叠波导行波管设计中, 提出了一种相速跳变设计思路, 使得电子在输出段也能一直与行波场间发生同步作用。最后通过优化设计, 扩展了行波管的带宽与效率, 满足系统指标要求。

1 理论基础

在电子与行波场的相互作用过程中, 由于运动较快的电子逐渐进入行波场的加速场, 当位于加速场中的电子和

处于减速场中的电子数量接近时, 电子将无法将能量交给行波场, 于是出现饱和现象。

在行波管的小信号理论中, 能够表征电子与场的同步关系的是速度参量 b :

$$b = \frac{u_0 - v_0}{Cv_0} \quad (1)$$

式中: u_0 是电子注的初始相速度; v_0 是行波场的初始相速度; C 是小信号理论中的增益参量, 可以表征相互作用的效率大小。

电子与行波场的这种同步关系受到了破坏, 严重时电子将从行波场中吸收能量, 特别是在行波的输出段, 电子的 u_0 随着线路的增加而减小, 导致 b 减小。为维持电子注与行波场之间的同步关系, 可通过减小行波场的相速度 v_0 来实现。因此注波相互作用效率随着距离的增加而增加, 可以通过降低行波场的相速度 v_0 来补偿。

下面分析折叠波导慢波结构的色散特性, 获得相速度减小的结果。

2 高频特性计算

折叠波导慢波结构采用电场面弯曲波导构成, 沿轴线方向按一定周期排列, 折叠波导慢波结构的三维几何结构见图 1^[7-8], 图中 a 表示波导宽边长度, b 表示波导窄边长度, p 为半几何周期, R 为弯曲部分的中心半径, 电子束通道半径为 r_c 。

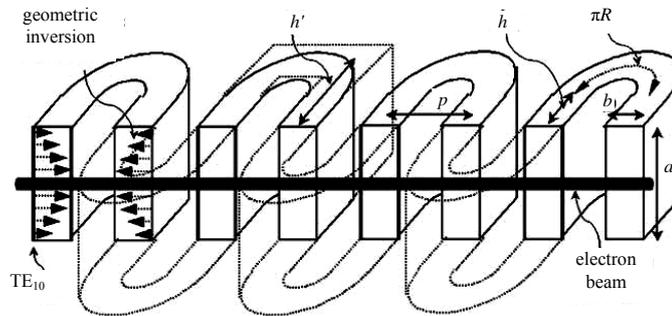


Fig.1 Diagram of folded waveguide slow wave structure
图1 折叠波导慢波结构示意图

根据理论计算, 可以得到折叠波导慢波结构的色散方程:

$$f^2 = f_c^2 + \left[\frac{cp}{2\pi(h + \pi p/2)} \right]^2 [\beta_m - (2m+1)\pi/p]^2 \quad (2)$$

折叠波导轴线耦合阻抗为:

$$K_m = \frac{Z_0}{(\beta_m p)^2} \left[\frac{\sin(\beta_m b/2)}{\beta_m b/2} \right]^2 \frac{1}{I_0^2(k_m r_c)} \quad (3)$$

式中: Z_0 为波导等效阻抗; β_m 为第 m 次空间谐波的相位常数; $k_m^2 = \beta_m^2 - k^2$, k 为空间相位常数, m 为谐波阶数; I_0 为零阶变型贝塞尔函数; f_c 为截止频率。

初始的波导宽边 a 为 1.22 mm, 半几何周期 p 为 0.35 mm, 直边的高度 h 为 0.4 mm。分别优化几何结构 h 的大小, 从 h 为 0.4 mm 开始, 变化到 h 为 0.48 mm, 得到了色散曲线的变化趋势, 如图 2 所示。由图 2 可以发现, 当 h 为 0.4 mm, 140 GHz 时, 慢波的相速比为 0.233 8; 随着直边高度的增加, 当 h 为 0.48 mm, 140 GHz 时, 慢波的相速比为 0.228。说明慢波的相速在缓慢降低, 可以达到与相互作用后的电子同步的目的。

同时也计算了从 h 为 0.4 mm 开始, 变化到 h 为 0.48 mm, 得到的耦合阻抗的变化曲线图, 如图 3 所示。由图 3 可以发现, 耦合阻抗在这个范围内降低不多, 当 h 为 0.4 mm, 140 GHz 时, 慢波的耦合阻抗为 3.337; 随着直边高度的增加, 当 h 为 0.48 mm, 140 GHz 时, 慢波的耦合阻抗为 2.93。说明慢波的耦合阻抗降低较少, 这样与电子相互作用的效率不会下降多少。后面还需要对整个慢波结构进行大信号的计算分析, 优化得到相互作用结果。

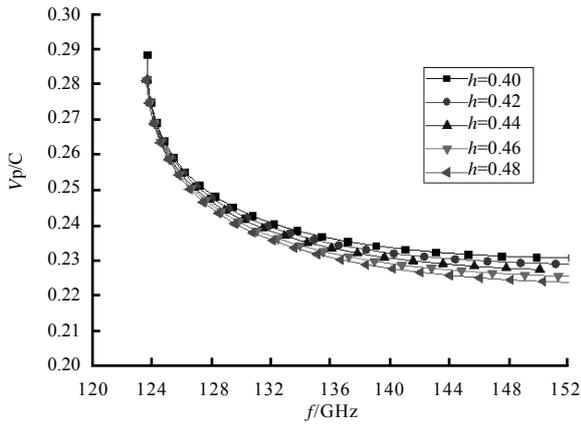


Fig.2 Dispersion curves before and after phase velocity change
图 2 相速渐变前后的慢波结构色散曲线

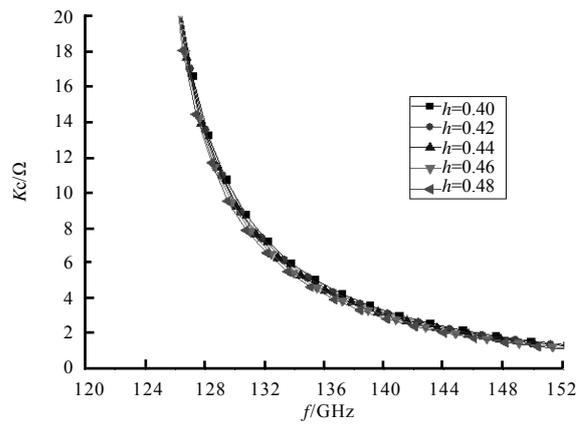


Fig.3 Impedance curves before and after phase velocity change
图 3 相速渐变前后的慢波结构耦合阻抗曲线

3 大信号计算与优化

对折叠波导慢波特性和分析后,进行大信号的注波相互作用计算。为对比效率改善前后的变化,在整个折叠波导的相互作用线路计算时,分别选择不跳变的、色散均匀的慢波结构和采用三级跳变的色散变化的慢波结构,如图 4 和图 5 所示。

在色散均匀的慢波结构中,输入段和输出段都为 $h=0.4$ mm 的参数,在输入段与输出段之间加入截断结构,如图 4 所示。在色散跳变的慢波结构中,输入段仍采用 $h=0.4$ mm 的参数,输出段则采用三级跳变的结构,先由 $h=0.4$ mm 变化到 $h=0.42$ mm,再变化到 $h=0.44$ mm,这样选择可使耦合阻抗变化最小。经过优化后,选择合适的变化起始位置,其相速分布如图 5 所示。

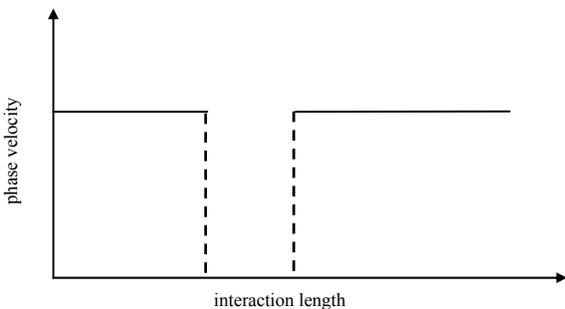


Fig.4 No change in phase velocity with slow wave structure length
图 4 原有慢波相速度随结构长度不变的情况

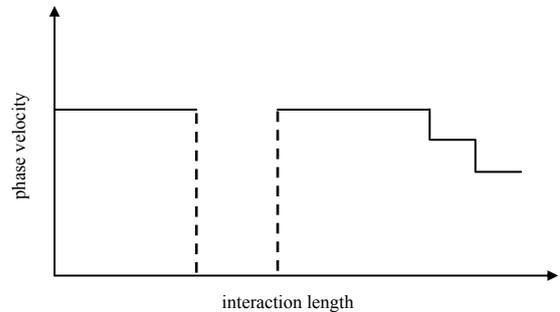


Fig.5 Phase velocity changing with slow wave structure length
图 5 现有慢波相速度随结构长度变化的情况

将 2 种折叠波导结构分别代入到大信号计算程序中进行建模,其三级跳变的结构模型见图 6。在输出段可以看到折叠波导直边的高度变高了 2 次。

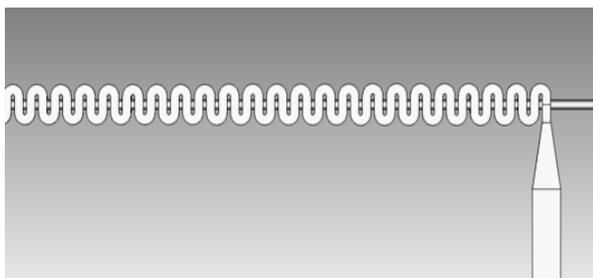


Fig.6 Large signal simulation model of three-level tapering
图 6 三级跳变折叠波导的大信号计算模型

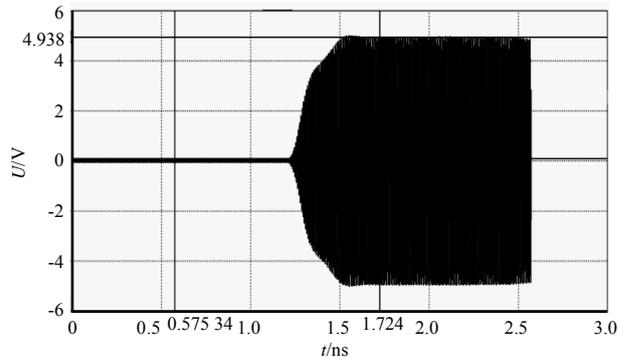


Fig.7 Voltage result of amplified signal after phase velocity change
图 7 相速变化后的放大信号电压曲线

分别计算2种结构的输出功率与效率变化结果,其中工作电流30 mA,工作电压14.95 kV,色散变化前后的电压和电流都不变,其相应的输入功率和工作长度不变,这样可以对比2种结构的输出功率与效率的变化结果。使用大信号计算程序得到了输出端口的放大电压值,见图7。对输出电压进行计算,可以得到放大的输出功率值,见图8,其中输入功率为10 mW。经过对工作电压和工作电流的计算,可得到信号放大的效率,见图9。由图8和图9看到,从136 GHz到142 GHz的整个频率范围内,功率和效率都得到了提高。在140 GHz时功率提高了0.84 W,效率提高了9.13%;在138 GHz时功率提高了1.08 W,效率提高了12.3%;在142 GHz时功率提高了0.88 W,效率提高了10.4%。因此相应的-1 dB工作带宽由原来的5 GHz提高到7 GHz。说明在未采用色散变化结构前,其效率随着慢波长度的变化,在慢波的输出段后,管子的增益出现了饱和的现象,使得效率下降了。而采用了色散变化结构之后,在慢波的输出段,增益仍然在增长,效率得到了提高。这表明电子与行波场之间仍然在同步条件下工作,促使了增益的继续增加,这也使电子的工作效率得到了提高,相速变化结构显著提高了行波管的工作效率和工作带宽。

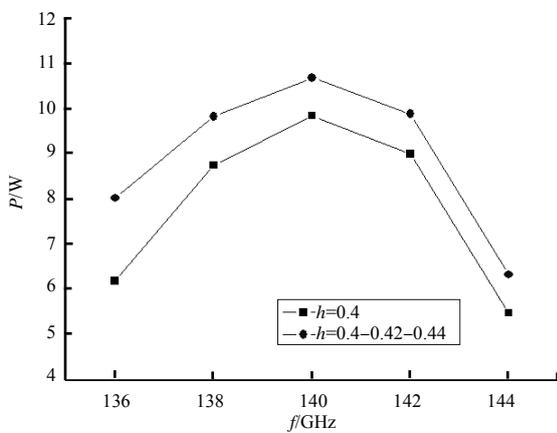


Fig.8 Power & frequency comparison between two kinds of structure

图8 对比两种结构的功率与频率的变化关系曲线

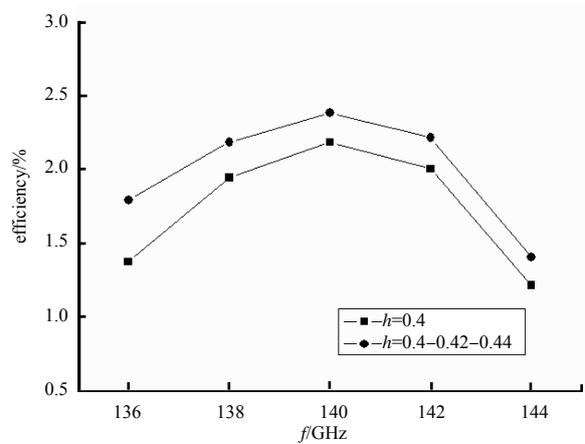


Fig.9 Efficiency & frequency comparison between two kinds of structure

图9 对比两种结构的效率与频率的变化关系曲线

4 结论

本文提出了一种慢波结构三级相速跳变的设计方法,通过色散和耦合阻抗的优化,在0.14 THz折叠波导行波管的大信号程序计算中,提高了电子的相互作用效率。与未采用相速跳变的慢波结构相比,在140 GHz时功率提高了0.84 W,效率提高了9.13%;在138 GHz时功率提高了1.08 W,效率提高了12.3%;在142 GHz时功率提高了0.88 W,效率提高了10.4%。因此相应的-1 dB工作带宽由原来的5 GHz提高到7 GHz。

后面将通过实际制管和实验测试的方法来验证色散相速跳变的设计准确性,为大功率宽带太赫兹行波管的高效率设计提供了一种参考方法。

参考文献:

- [1] 冯进军. 集成真空电子学[J]. 真空电子技术, 2010(2):1-7. (FENG Jinjun. Integration microwave vacuum electronics[J]. Vacuum Electronics, 2010(2):1-7.)
- [2] 张章. 太赫兹行波管的研究进展[J]. 激光与红外, 2012,42(3):250-257. (ZHANG Zhang. Research progress of THz traveling wave tubes[J]. Laser & Infrared, 2012,42(3):250-257.)
- [3] 雷文强,蒋艺,胡林林,等. 0.14 THz折叠波导行波管的设计与实验研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(3):334-338. (LEI Wenqiang,JIANG Yi,HU Linlin,et al. Design and experiment for 0.14 THz Folded Waveguide Traveling Wave Tubes[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(3):334-338.)
- [4] 雷文强,蒋艺,周泉丰,等. D波段7 W连续波折叠波导行波管的研制[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(2):13-18. (LEI Wenqiang,JIANG Yi,ZHOU Quanfeng,et al. Research for D band 7 W continuous-wave Folded Waveguide Traveling Wave Tube[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(2):13-18.)
- [5] GHOSH T K,CHALLIS A J,JACOB A,et al. Design of helix pitch profile for broadband Traveling-Wave Tubes[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2009,56(5):1135-1140.

[6] SRIVASTAVA V,CARTER R G,RAVINDER B,et al. Design of helix slow-wave structure for high efficiency TWTs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2000,47(12):2438–2443.

[7] HAN S T,JANG K H,SO J K,et al. Low-voltage operation of Ka-band folded waveguide traveling-wave tube[J]. IEEE Trans. Plasma Science, 2004,32(1):60–66.

[8] BOOSKE J H,CONVERSE M C,KORY C L,et al. Accurate parametric modeling of folded waveguide circuits for millimeter-wave traveling wave tubes[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2005,52(5):685–694.

作者简介:



雷文强(1972-), 男, 重庆市人, 博士, 副研究员, 主要从事真空电子学和太赫兹技术的相关研究.email:leton@163.com.

蒋 艺(1983-), 男, 成都市人, 硕士, 助理研究员, 主要从事大功率太赫兹器件的设计.

周泉丰(1984-), 男, 四川省荣县人, 副研究员, 主要从事大功率太赫兹电真空器件及信号测量方面的研究工作.

胡 鹏(1985-), 男, 四川省绵阳市人, 助理研究员, 主要从事毫米波真空器件的电子学技术研究工作.

马国武(1981-), 男, 四川省凉山州人, 博士, 副研究员, 主要从事高功率微波器件、大功率毫米波器件的研究.

陈洪斌(1971-), 男, 重庆市人, 博士, 研究员, 主要从事毫米波和太赫兹器件的研究.

中国工程院第四届“空间信息技术与应用展望”院士论坛 暨 2017 年卫星有效载荷学术年会征文通知

根据航天科技集团公司卫星有效载荷专业组的工作安排, 拟定于 2017 年 9 月在北京召开“第四届空间信息技术与应用展望院士论坛暨 2017 年卫星有效载荷学术年会”。本次会议由中国工程院信息与电子工程学部、中国电子学会、中国宇航学会、中国空间技术研究院科技委通信与导航有效载荷专业组主办, 由中国空间技术研究院西安分院、重庆大学空间技术研究室、空间微波技术重点实验室、中国电子学会空间电子学分会、中国宇航学会空间电子学专业委员会、中国航天科技集团公司科技委有效载荷技术专业组、中国空间技术研究院科技委遥感有效载荷专业组承办。

会议主题以“空间信息技术及有效载荷前沿技术”进行学术研讨。会议旨在围绕“加快推进航天强国建设”的目标, 促进和提升空间有效载荷新技术的发展, 积极创新。现面向国内外从事卫星有效载荷研究工作的各科研单位技术人员、高等院校相关专业的广大师生征集论文。会议将采取大会特邀报告、分组讨论、论文评审相结合的方式进行交流, 会议编辑论文集, 并评选优秀论文。欢迎有关专家、技术人员及在校博硕士研究生踊跃投稿。大会具体内容和征稿具体要求参见《空间电子技术》或《太赫兹科学与电子信息学报》(www.iaeej.com)。论文截稿日期: 2017 年 7 月 10 日(来稿请注明“2017 年有效载荷论文”); 要与 Word 2000 兼容)

本单位、集团内部投稿安全邮箱: mayj@c504.cast.casc; 外网电子稿件接收信箱: space504f@163.com。

会议筹备: 五院西安分院科技委

联系人: 马逸君(西安分院) 联系方式: 029-85673708 传真: 029-89253222

崔万照(西安分院) 联系方式: 029-85673959 传真: 029-89253222

西安分院通信地址: 陕西省西安市东长安街 504 号 504 所东区科技委(邮编: 710100)