

基于电子注可回收能力的空间行波管慢波结构的优化设计*

易红霞^{1)2)†} 肖 刘¹⁾ 刘濮鲲¹⁾ 郝保良¹⁾²⁾ 李 飞¹⁾²⁾ 李国超¹⁾²⁾

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

2)(中国科学院研究生院,北京 100190)

(2010年4月10日收到;2010年8月23日收到修改稿)

探索了一种行波管效率提高的优化设计方法.该方法在不降低电子效率的前提下,对慢波结构进行优化以获得相互作用后电子注能量台阶状的分布,为研制高回收效率的收集极奠定基础.提出了用最大可回收效率表示的目标函数来衡量电子注的可回收能力.与单纯以电子效率为目标的慢波结构优化相比,以电子注可回收能力最大化为目标的慢波结构优化,不仅能在工作频带内提高总效率,而且行波管的非线性指标没有明显降低,小信号增益却有较大的提高.

关键词: 空间行波管, 可回收能力, 慢波结构, 优化设计

PACS: 84.40.Fe, 84.40.-x, 87.55.de

1. 引言

空间行波管作为末级功率放大器的关键器件,广泛应用于通信卫星、导航卫星、气象卫星等领域^[1-4].空间行波管是卫星通信设备中最消耗能源的电子设备,效率的提高可以减少能源的消耗,带来直接经济效益^[5].效率是空间行波管设计的重要技术指标之一^[6],行波管效率主要取决于电子效率和收集极的回收效率.慢波结构与电子注的质量决定了电子效率的高低,通过优化设计慢波结构来提高电子效率,使进入收集极的电子注能量最小是提高行波管效率的方法之一.收集极的回收效率主要由相互作用后的电子注能谱和收集极结构决定.通过增加降压收集极的级数并优化设计多级降压收集极的几何参数,尽可能回收进入收集极的电子注能量是提高行波管效率的另一种有效方法.这两种传统方法虽然可以有效地提高行波管的效率,但由于慢波结构的设计和收集极的设计相互独立,这两种优化设计不可能获得行波管效率的最大化.仅仅以电子效率为目标的慢波结构的优化设计,往往使进

入收集极的电子注能量分布离散性较大,不利于废弃能量的回收.通过增加降压收集极的级数来提高回收效率,需要电源具有很好的负载特性,增加了电源的复杂性,且随着级数的增加,对行波管效率的增加不再明显.对能量分散大的电子注进行回收需要结构复杂的收集极,这将使得需要优化的结构参数增多,优化过程变得复杂.如何从全局角度将慢波结构的优化和多级降压收集极的优化设计结合起来,对行波管的效率提高有重要意义.

Komm 等^[5]提出了一种新概念——电子注可回收能力,它是指注波相互作用之后的电子注能被有限级数的收集极回收的能力.通常具有高可回收能力的废弃电子注,它的能谱几乎集中在几个单一能量点上,即能量分布具有台阶状的分布函数.当电子效率很高时,相互作用后的电子注的能量分散很大,但如果电子注能量呈台阶状分布,则电子注仍然具有很大的可回收潜力.Boeing Electron Dynamic 公司通过改善作用完了的电子注能量分布,使行波管效率达到了70%以上^[5].但是文献[5]中并没有对改善电子注能量分布的方法进行描述,而这种方法将给空间行波管研制者有益的指导.

相速渐变/跳变技术是提高螺旋线行波管效率

* 国家自然科学基金重点项目(批准号:60931001)和国家自然科学基金青年科学基金(批准号:60801030)资助的课题.

† E-mail: hongxia.yi@gmail.com

的一种重要技术手段,在宽带行波管和窄带行波管设计中,通常采用不同的渐变/跳变模式. 对于窄带行波管的研制,相速负渐变/跳变技术能有效降低慢波相速,使电磁波和电子注在输出段再一次保持同步. 而对于宽带行波管,负渐变/跳变技术往往只能提高优化频点及其附近频率的效率,在远离优化频点的其他频段,电子效率反而降低,通常采用相速正渐变/跳变技术来提高整个频带内的效率^[7-9]. 空间行波管作为星上末级功率放大器件,工作频带要求通常不会太宽,一般为 500 MHz,因而本文采用了窄带行波管中常用的双渐变螺旋线慢波结构.

以电子注的可回收能力作为目标,往往会出现电子注的可回收能力很高而电子效率却很低的情况,在优化算法中通过设定电子效率大于一个恒定值作为限定条件来避免出现这样的情况. 本文首先提出用电子注的最大可回收效率表示的目标函数来衡量电子注的可回收能力. 优化设计螺旋线慢波结构,使离开相互作用电路的电子注具有更优的电子能谱,以提高电子注的可回收能力. 并设定电子效率大于 25% 这个限制条件来保证具有高可回收能力的电子注,同时具有较高的电子效率. 比较基于可回收能力慢波结构优化与基于电子效率慢波结构优化的优劣,结果表明,基于可回收能力慢波结构的优化在提高总效率以及行波管小信号增益方面更有优势.

2. 目标函数和优化过程

优化设计作用完了电子注的能量分布,并基于该能量分布设计多级降压收集极是一种有效地提高行波管效率的方式. 对于特定的电子注能量分布,设计多级降压收集极的步骤如下:首先,给出注-波相互作用后的电子能谱图. 图 1 是采用电压 V_i 和电流 I_i 形式表示的相互作用后电子注能谱,电压和电流分别对行波管的螺旋线电压和电子注总电流进行了归一化. 然后,根据电子注的能谱图确定多级降压收集极的级数并计算最大回收效率对应的最优电压. 最后,设计合适形状的多级降压收集极尽可能地回收进入收集极的废弃能量. 为了方便地计算多级降压收集极的最优电压并有效地分析电子注的可回收能力,将图 1 电子注能谱图采用更直观的电子注可回收能力分析图(图 2)来表示. 图 2 中归一化电压 E_{ij} 与归一化电流 I_{ij} 的关系采用如下计

算形式^[10]:

$$I_{ij} = 1 - \sum_{V_i < E_{ij}} I_i \quad (i, j = 1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

其中 n 为柱状图中柱的个数,即为了绘制电子注的能谱图,将电子的能量范围分为 n 等分; V_i 和 I_i 为图 1 中的归一化电压和归一化电流; I_{ij} 为归一化电压为 E_{ij} 的电极上可回收的归一化电流. 由(1)式计算的结果为 n 组归一化收集极电压 E_{ij} 与归一化收集极电流 I_{ij} 的关系,将这 n 组数据采用多项式拟合,即为收集极入口处的电子注能量分布函数 $p(v)$. 电子注能量分布函数 $p(v)$ 下的面积反映了进入收集极的电子注的总能量. 在不考虑返流和二次电子发射的情况下,由收集极的最优电压 v_1, v_2, \dots, v_m (m 表示降压收集极的级数)确定的阶梯函数 $s(x)$ 下的面积反映了收集极对这种电子注能量分布最大可以回收的能量. 图 2 以采用三级降压收集极回收废弃能量为例,给出了三阶台阶型曲线. 曲线 $p(v)$ 下的面积和曲线 $s(x)$ 下的面积差

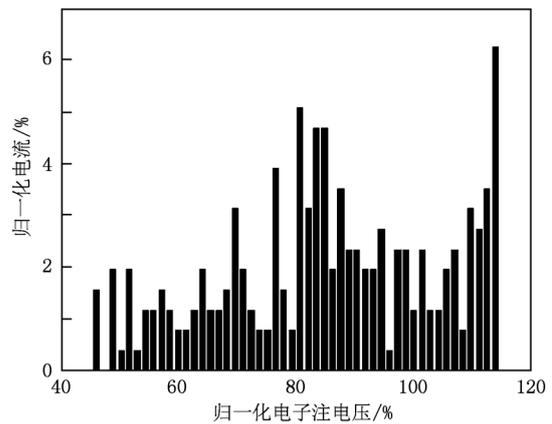


图 1 相互作用后的电子注能谱

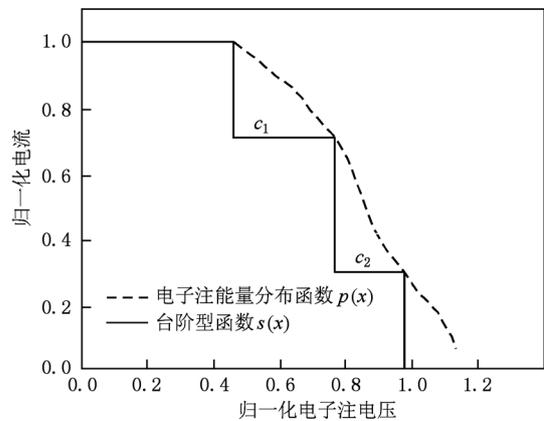


图 2 电子注的可回收能力分析

值是收集极不能回收且最终以热量的形式耗散的能量. 对这两个面积的差值求极小值, 可以求得收集极的最优归一化电压 v_2, \dots, v_m . 最大的可回收效率可定义为台阶型函数 $s(v)$ 下的面积与电子注能量分布函数 $p(v)$ 下的面积之比. 台阶型函数可以表示成如下形式:

$$s(v) = \begin{cases} 1 & (0 \leq v < v_1), \\ c_1 & (v_1 \leq v < v_2), \\ \dots & \\ c_{m-1} & (v_{m-1} \leq v < v_m), \end{cases} \quad (2)$$

其中 $c_{m-1} = p(v_m)$. 最大可回收效率可以写成

$$\eta_{\text{coll}} = \max \left[\frac{\int_0^{+\infty} s(v) dv}{\int_0^{+\infty} p(v) dv} \right] = \max \left[\frac{v_1 + c_1(v_2 - v_1) + c_2(v_3 - v_2) + \dots + c_{m-1}(v_m - v_{m-1})}{\int_0^{+\infty} p(v) dv} \right], \quad (3)$$

行波管的电子效率 η_{ele} 等于输出功率与输入功率的差值与电子注功率之比, 即

$$\eta_{\text{ele}} = \frac{P_{\text{out}} - P_{\text{in}}}{V_b I_b}, \quad (4)$$

其中 P_{out} 和 P_{in} 分别为行波管高频信号的输出功率和输入功率, V_b 和 I_b 分别为电子注的电压和总电流. 如果忽略热子功率、线路损耗、电磁线包功率等, 假设采用理想的多级降压收集极, 即最大可回收效率为收集极效率, 则最大总效率 η_{max} 可以写为

$$\eta_{\text{max}} = \frac{\eta_{\text{ele}}}{1 - \eta_{\text{coll}} \left(1 - \eta_{\text{ele}} - \frac{P_{\text{RF}}}{I_b V_b} \right)}, \quad (5)$$

其中 P_{RF} 是谐波、交调输出功率.

基于可回收能力慢波结构的优化可以写成

$$\min[f(x)] = 1 - \eta_{\text{coll}}, \quad \eta_{\text{ele}} - 25\% \geq 0. \quad (6)$$

我们采用图 3 所示的螺距及衰减量分布. 该电路的螺距分布曲线由输入段 (AB 段) 和输出段 (BE 段) 组成, 输出段又分为相速增加段 (BC 段) 和相速降低段 (CE 段). 输入段 (AB 段) 用来建立增长波, 提供一个增益至少大于 20 dB 的增长波. 相速增加段 (BC 段), 起到相位补偿的作用, 同时还应尽可能形成有效的电子群聚. 相速降低段 (DE 段), 这一段群聚电子将能量交给高频场, 保证能够在输出位置得到饱和的输出功率. 采用这样的螺距分布, 可以增加行波管输出段中减速电子的比例, 减少加速电子的比例^[11]. 为了便于生产, 将跳变的起始点作为切断的中心设置, 衰减器的长度和衰减量预先设定, 线路的总长度选在常螺距行波管饱和输出功率

位置. 采用扇形无翼片加载的慢波结构, 同一频点下不同螺距的色散关系、耦合阻抗均预先给定, 图 4 给出了频率为 13.4 GHz 时不同螺距的色散和耦合阻抗. 本文是对中国科学院电子学研究所正在研制的 Ku 波段 (工作频带为 13.2—13.8 GHz) 脉冲螺旋线行波管的进一步优化设计, 螺旋线电压 V_0 、电子注电流 I_b 、输入功率 P_{in} 以及磁场等参数均是在实际行波管的基础上做了调整, 且在整个优化过程中均不改变. A 和 E 是起始点和终点, 主要优化的对象是 B, C, D 点的位置以及各段的螺距.

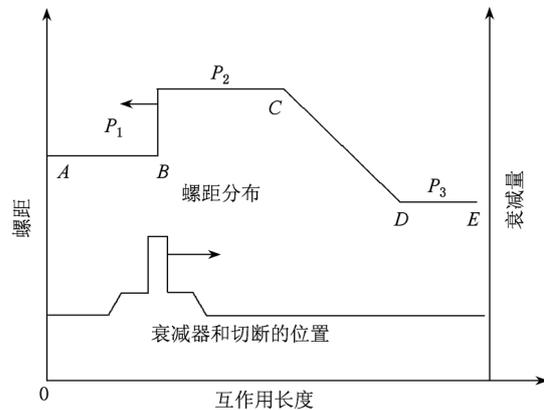


图 3 螺距及衰减量分布示意图

调用 3 维微波管模拟套装 (MTSS) 中的非线性注-波相互作用模拟模块 (BWIS)^[12] 计算输出功率和进入收集极的电子注的能量分布. 遗传算法在解决目标函数空间为非凸、分段、不连续或分布不均匀时更有优势^[13,14]. 在优化过程中, 首先选择种群大小, 确定交叉和变异概率等遗传参数, 设置各段螺

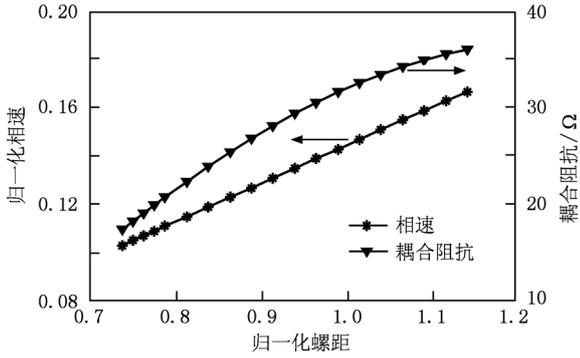


图4 归一化相速和耦合阻抗与螺距的关系

距的最大值和最小值, 设定各段长度的最大值和最小值, 并随机初始化种群, 每一个个体是具有一定螺距分布的行波管; 调用 3 维 BWIS 程序计算注-波相互作用后该种群所有个体的输出功率和进入收集极的电子注的能量分布, 按照 (3) 和 (4) 式便可以计算每一个个体的最大回收效率和电子效率; 按照 (6) 式设定优化算法的适应值, 根据遗传策略^[15], 运用选择、交叉和变异作用于群体, 形成下一代群体; 判断群体性能是否满足优化目标或者已完成预先设定的迭代次数, 不满足则返回上一步。

3. 优化结果和讨论

本文以采用三级降压收集极为例, 台阶型函数用三阶表示. 图 5 是优化后的螺距分布示意图. 假设 P_0 是优化前慢波结构的螺距, 图中纵坐标为对

P_0 归一化后的螺距, 横坐标为归一化相互作用长度. 图 6(a) 所示是优化后的行波管高频信号的输出功率, 与优化前相比, 输出功率有了较大的提高. 这是因为在优化过程中采用电子效率大于 25% 这个限制条件, 保证了较高的输出功率. 图 6(b) 是废弃电子注的可回收能力的比较, 经过优化, 进入收集极的电子注能量分布曲线具有更明显的台阶状特征. 优化后的电子注的能量分布从 $0.38 V_b$ 到 $1.09 V_b$, 优化前行波管的电子注能量分布从 $0.48 V_b$ 到 $1.13 V_b$. 经过优化, 较高的电子效率使得电子注失去了较多的能量, 能量分散略大, 但是由于电子注能量具有台阶状分布, 电子注具有更高的可回收能力. 在优化频点 13.4 GHz, 优化后的行波管可回收效率提高到 89%, 电子效率为 26.9%, 最大总效率从 66% 提高到 74.1%.

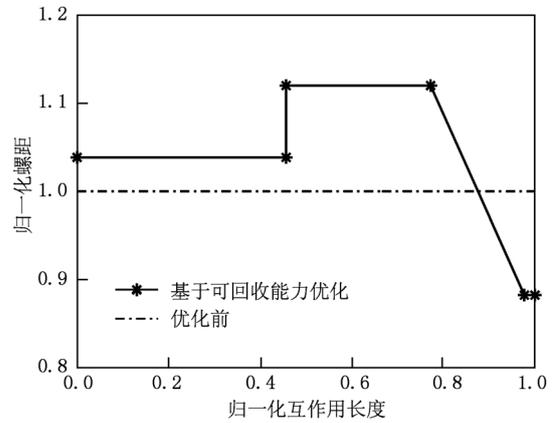


图5 螺距分布图

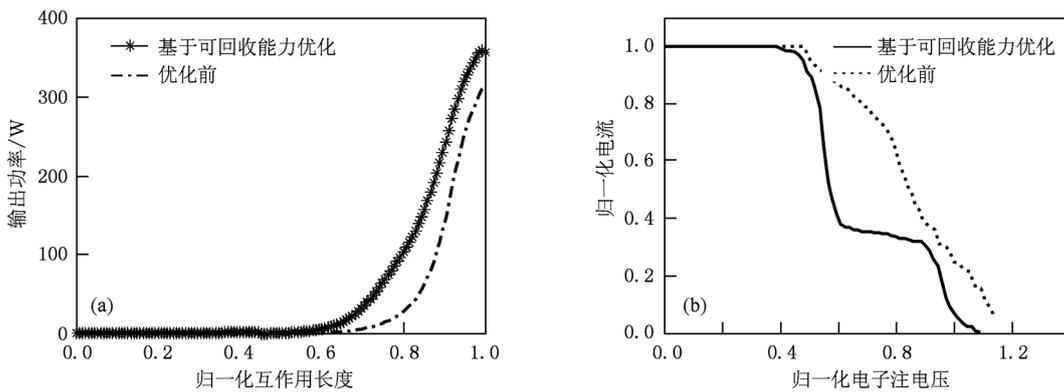


图6 优化前后结果比较 (a)13.4 GHz 时的输出功率; (b)13.4 GHz 时电子注的可回收能力

为了研究行波管性能与各段螺距的关系, 本文考察了优化后的慢波结构的各段螺距发生变化时 (其他参数均不变), 行波管的电子效率和最大

可回收效率的变化情况, 如图 7 所示. 螺距 P_1 对最大可回收效率的影响小, 但对电子效率的影响较大. 电子注在输入段受高频信号的调制非常小,

能量分散很小,螺距 P_1 对最大可回收效率影响较小. 输入段是建立增长波段,往往调整螺距 P_1 使输入段工作在最大小信号增益的状态,才能有效提高电子效率^[11]. 当 P_2 从 $1.06P_0$ 增加到 $1.12P_0$ 时,电子效率和最大可回收效率均增加,说明存在使电子效率和最大可回收效率均达到最大值的螺距 P_2 ,同时电子注在相速增加段形成了良好的群聚. $P_3 > 0.8P_0$ 时,电子效率随 P_3 的增加而减少,而最大可回收效率有一个最大值. 电子在输出段

由于交出能量,速度进一步降低,为了恢复电子和 高频信号应有的速度差,螺距 P_3 必须减小到某个有效值. 电子注在输出段受高频信号的调制越来越大,能量分散逐渐增大,最大可回收效率受螺距变化的影响增大.

4. 与单纯以电子效率为目标的慢波结构优化的比较

以电子效率作为目标对慢波结构进行优化是一种常用的提高行波管效率的方法,为了比较基于可回收能力慢波结构的优化相对该种方法的优劣,我们将这两种优化方法得到的结果分别代入 3 维注-波互作用程序计算,比较行波管增益、线性度和在工作频带内的最大总效率.

调幅/调相(AM/PM)转换系数 K_p 常被用来表征行波管的相位失真,其表达式如下:

$$K_p = \Delta\theta/\Delta P_{in}, \quad (7)$$

其中 $\Delta\theta$ 是输出信号的相位移, ΔP_{in} 是输入信号功率的变化量,输入功率的单位为 dBm, K_p 的单位为 $(^\circ)/\text{dB}$. 图 8 是优化后慢波结构的螺距分布比较,基于可回收能力优化的各段螺距均比以电子效率为目标优化的各段螺距大. 图 9 给出了在 13.4 GHz 频点时基于可回收能力慢波结构优化的行波管和以电子效率为优化目标的行波管的增益和 Am-Pm 系数的比较. 用两种方法优化的慢波结构,增益随输入功率提高均有略微的增加,分别为 +1.9 和 +0.7 dB,这是高效率器件的典型行为^[16]. 基于可回收能力慢波结构优化的行波管具有 58.8 dB 的小信号增益和 48.8 dB 的饱和增益(饱和输入功率为 6.99 dBm),而基于电子效率慢波结构优化的行波

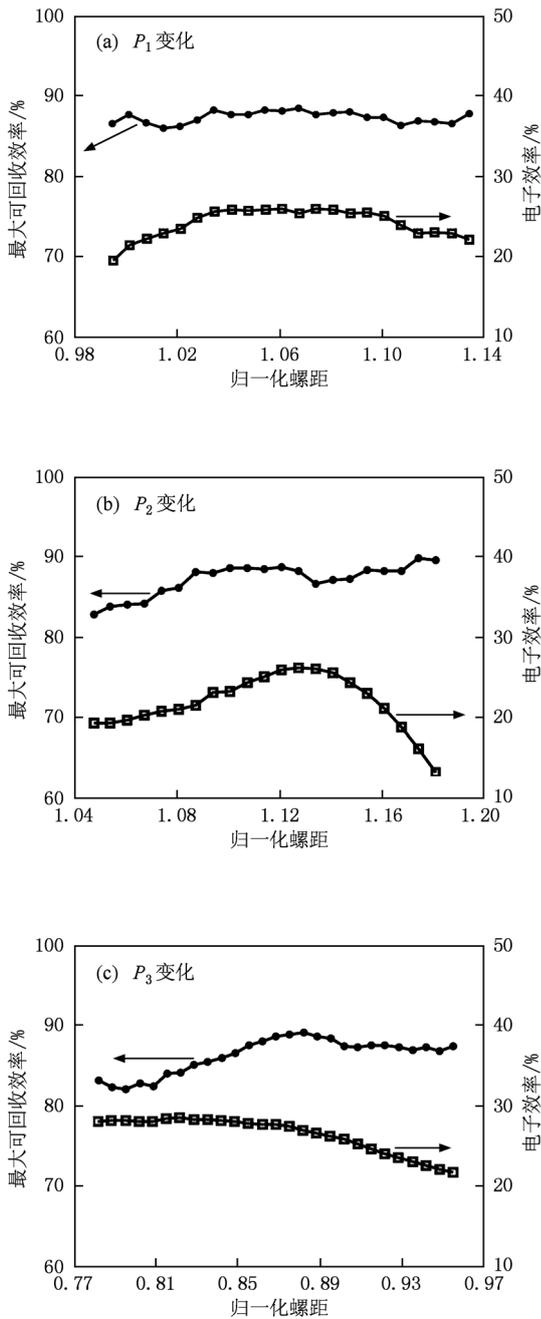


图 7 螺距变化对电子效率和最大可回收效率的影响 (a) P_1 变化; (b) P_2 变化; (c) P_3 变化

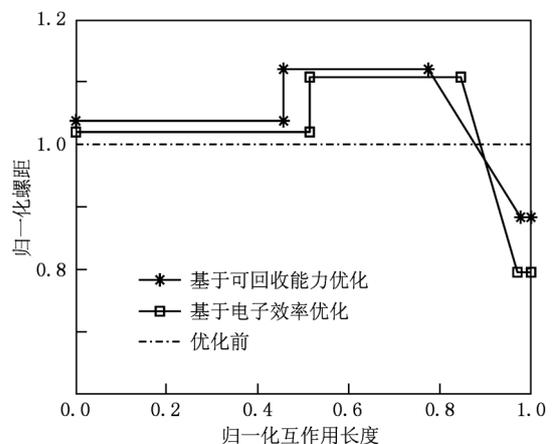


图 8 基于可回收能力和电子效率优化后螺距的分布

管具有 56.8 dB 的小信号增益和 49.2 dB 的饱和增益(图 9(a)). 如图 9(b)所示,基于可回收效率慢波结构优化的行波管非线性度较大,饱和输出功率点(饱和输入功率为 6.99 dBm)的 AM/PM 转换系数

数比基于电子效率慢波结构优化的行波管的 AM/PM 转换系数大 $1.0^\circ/\text{dB}$. 采用基于可回收能力慢波结构的优化,提高了行波管的小信号增益,但没有显著降低行波管的非线性指标.

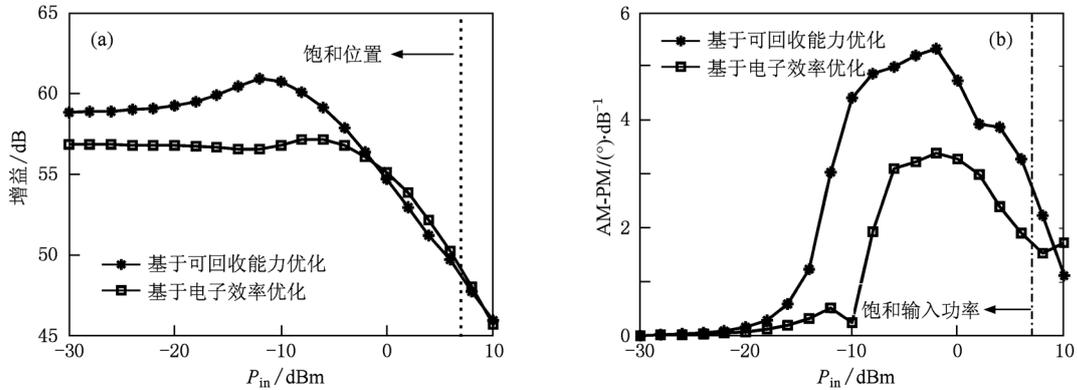


图 9 在 13.4 GHz 采用两种优化方法所得结果比较 (a)增益;(b)AM-PM 系数

图 10 给出了采用这两种优化方法优化后行波管的最大总效率在工作频带内的比较. 与基于电子效率优化的行波管最大总效率相比,基于可回收能力优化的行波管在低频段总效率具有显著的提高,在 13.2 GHz 最大总效率提高了 3.3%,而高频段仅在 13.8 GHz 最大总效率有略微的下降(下降了仅 0.3%). 采用基于可回收能力的优化方法,最大总效率的最高点(在 13.4 GHz)与最低点(在 13.8 GHz)相差仅 1.8%,而采用基于电子效率的优化方法,最大总效率的最高点(在 13.5 GHz)与最低点(在 13.2 GHz)相差了 2.8%. 采用基于可回收能力慢波结构的优化方法,行波管的最大总效率在整个工作频带内变得比较平坦. 基于电子效率慢波结构

优化的行波管在低频段总效率比高频段低,这是因为电子注在低频段能量分散较大,可回收效率低的缘故.

5. 结 论

提出了用最大可回收效率来衡量相互作用后电子注可回收能力的目标函数. 通过优化螺旋线慢波结构,使进入收集极的电子注具有较高的可回收能力,并设置电子效率大于 25%,以保证具有较高电子效率的高频信号输出. 优化的结果表明:相互作用后的电子注能量呈明显的台阶状分布,为下一步研制高回收效率的降压收集极奠定基础. 和单纯的基于电子效率慢波结构的优化相比,以电子注可回收能力为目标,对慢波结构进行优化,不仅能够在工作频带内提高总效率,而且提高了行波管的小信号增益,同时也没有显著降低行波管的非线性指标.

对慢波结构和降压收集极同时进行优化设计,是一种全局的提高行波管效率的方法,然而这将耗费巨大的计算资源. 对慢波结构的参数进行优化,不仅可以提高电子效率而且可以改善相互作用后电子注的能量分布. 以提高电子注的可回收能力作为目标,优化慢波结构,以改善电子注的能量分布,可将慢波结构的优化和多级降压收集极的设计结合起来,实现行波管效率的最大化.

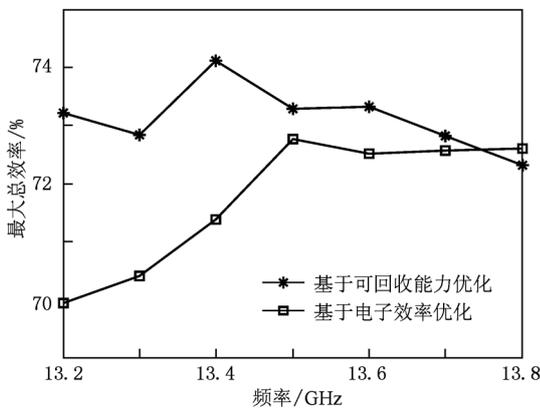


图 10 在工作频段两种优化电路的最大总效率比较

- [1] Hao J H, Ding W 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1136 (in Chinese) [郝建红、丁武 2004 物理学报 **53** 1136]
- [2] Li B, Yang Z H 2003 *Chin. Phys.* **12** 1235
- [3] Li J Q, Mo Y L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4117 (in Chinese) [李建清、莫元龙 2006 物理学报 **55** 4117]
- [4] Xiao L, Su X B, Liu P K 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5150 (in Chinese) [肖刘、苏小保、刘濮鲲 2006 物理学报 **55** 5150]
- [5] Komm D S, Benton R T, Limburg H C, Menninger W L, Zhai X L 2001 *IEEE Trans. Electron Devices* **48** 174
- [6] Duan Z Y, Gong Y B, Lü M Y, Wei Y Y, Wang W X 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 934
- [7] Jung S S, Soukhov A V, Jia B F, Park G S, Basu B N 2002 *Jpn. J. Appl. Phys.* **41** 4007
- [8] Ghosh T K, Challis A J, Jacob A, Bowler D, Carter R G 2008 *IEEE Trans. Electron Devices* **55** 668
- [9] Ghosh T K, Challis A J, Jacob A, Bowler D 2009 *IEEE Trans. Electron Devices* **56** 1135
- [10] Hao B L, Xiao L, Liu P K, Li G C, Jiang Y, Yi H X, Zhou W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3118 (in Chinese) [郝保良、肖刘、刘濮鲲、李国超、姜勇、易红霞、周伟 2009 物理学报 **58** 3118]
- [11] Srivastava V, Carter R G, Ravinder B, Sinha A K, Joshi S N 2000 *IEEE Trans. Electron Devices* **47** 2438
- [12] Li B, Yang Z H, Li J Q, Zhu X F, Huang T, Hu Q, Hu Y L, Xu L, Ma J J, Liao L, Xiao L, He G X 2009 *IEEE Trans. Electron Devices* **56** 919
- [13] Deb K, Joshi D 2001 *Technical Report KanGAL Report No. 2001003* (Kanpur; Indian Institute of Technology)
- [14] Wang X P, Cao L M 2002 *Genetic Algorithm: Theory, Application and Software* (Xi'an; Xi'an Jiaotong University Press) p104 (in Chinese) [王小平、曹立明 2002 遗传算法: 理论与软件实现 (西安:西安交通大学出版社) 第 104 页]
- [15] Kalyanmoy D 2000 *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* **186** 311
- [16] Abe D K, Levush B, Antonsen T M, Whaley D R, Danly B G 2002 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30** 1053

Optimization of slow wave structures of space traveling wave tube based on collectability of spent beam*

Yi Hong-Xia^{1)2)†} Xiao Liu¹⁾ Liu Pu-Kun¹⁾ Hao Bao-Liang¹⁾²⁾ Li Fei¹⁾²⁾ Li Guo-Chao¹⁾²⁾

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

2) (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 10 April 2010; revised manuscript received 23 August 2010)

Abstract

A design method to enhance the efficiency of traveling wave tube is explored. The stair-step energy distribution of spent beam which is beneficial for the development of high collector efficiency depressed collector is obtained via the optimization of slow wave structures without degrading the basic electronic efficiency. A goal function expressed in the form of maximum collector efficiency of spent beam is designed to evaluate the collectability of spent beam. The optimization of slow wave structure based on collectability enhances the overall efficiency in the operation frequency band, and improves the small signal gain, but does not degrade nonlinear characteristic greatly compared with the simply optimization of slow wave structure based on electronic efficiency.

Keywords: space traveling wave tube, collectability, slow wave structure, optimization design

PACS: 84.40.Fe, 84.40.-x, 87.55.de

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60931001) and the Young Scientist Funds of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60801030).

† E-mail: hongxia.yi@gmail.com