

行波管中多级降压收集极效率评估的研究*

李飞^{1)2)†} 肖刘¹⁾ 刘濮鲲¹⁾ 袁广江¹⁾ 易红霞¹⁾ 万晓声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 100049)

(2011年9月23日收到; 2011年10月24日收到修改稿)

在行波管中, 多级降压收集极 (MDC) 效率由于其与总效率的关系密切而显得非常重要. 而在设计 MDC 之前对其效率和行波管的总效率进行准确的评估可以把握管子的整体性能, 并为相关软件的开发提供理论指导, 因而对 MDC 的优化和行波管总效率的提高具有十分重要的意义. 虽然 Kosmahl 在 1980 年就给出了 MDC 的效率评估公式, 但其预测值比实测值偏高较多, 因而需要更为准确的评估公式. 本文首先引入耗散公差的概念, 然后建立作用完电子注等差三角能量分布模型推导了 MDC 效率评估的公式, 与 Kosmahl 给出的预测相比, 新公式的估计结果更接近实测值. 最后根据 MDC 效率最高和各个电极上耗散能量最低这两个极值条件, 给出了 MDC 最佳电极级数的选取公式, 其预测结果合理而且准确.

关键词: 多级降压收集极, 耗散公差, 等差三角能量分布, 效率

PACS: 29.20.Ba, 29.27.Bd, 31.15.xg

1 引言

行波管以其宽频带、高增益、高功率和多模工作的优点, 在当今微波频率的功率放大器件中占据重要地位, 与其相关的研究也越来越多地成为微波真空领域的热点^[1-10]. 由于经济利益的刺激, 行波管总效率的提高是行波管制造商们孜孜以求的目标, 而在影响行波管总效率的诸多因素中, 收集极效率的提高非常重要^[11-14].

现代高效率的收集极采用了若干个电位不同的电极, 有选择地分类收集处于不同能量等级的电子, 这种收集极称为多级降压收集极 (MDC)^[15-21]. 随着采用级数更多的收集极, 其效率会不断提高, 但是收集极结构的复杂化又会带来原始功率和热损耗的增加. 如何在这两者之间取得一个最佳的设计方案, 就需要行波管设计者们在设计 MDC 之前对其效率和管子的总效率做出初步的评估. 针对上述问题, Kosmahl^[22] 在 1980 年给出了经验的公式,

可以对收集极效率和管子的总效率做出比较准确的估计, 其公式的建立分为以下几步.

1) 给出最慢电子归一化的动能减少量 $\Delta V/V_0$ 与导流系数 p 和电子效率 η_e 之间的经验关系式:

$$\Delta V/V_0 \approx f(p) \cdot \sqrt[3]{\eta_e \cdot p}, \quad (1)$$

其中 ΔV 和 V_0 分别指用电压表示的作用完电子注中最慢 (也就是失去能量最多) 的那些电子失去的动能 (即 $\Delta V = \Delta E/e$, ΔE 指作用完电子注中最慢的那些电子损失的动能, 而 e 则表示电子电量) 和管体电压, p 表示管子的微导流系数, $f(p)$ 与 p 的关系以图线的形式在文献中给出.

2) 为了估计 MDC 的效率, 做出如下四条假设: ①作用完电子注的能量分布曲线 $I(V)/I_0$ vs V/V_0 近似是一个三角分布 (V 和 $I(V)$ 分别指收集极内变化的电极电压和与之对应的该电极可以收集到的电流, 而 I_0 和 V_0 则分别指作用完电子注的电流和管体电压); ② MDC 总共有 N 级, 其中包括

* 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项目 (批准号: 60801030, 60871054) 资助的课题.

† E-mail: lifei_00912@126.com

处在阴极电位的一级, 这些电极以相等的电位步长 ΔV_0 排列 ($N \geq 2$); ③各电极上的能量损耗都相等; ④ MDC 电极表面涂有二次电子抑制剂, 使得二次电子发射系数 $\delta \ll 1$.

3) 结合 1) 和 2), 建立模型求出收集极效率和行波管总效率的估计公式:

$$\eta_{\text{coll}} = 0.97 \left(1 - \frac{1}{N-1} \frac{f \cdot \sqrt[3]{\eta_e \cdot p}}{2 - f \cdot \sqrt[3]{\eta_e \cdot p}} \right) - \Delta, \quad (2)$$

$$\Delta = \Delta P_f / (I_0 V_0), \quad (2)$$

$$\eta_{\text{ov}} = \frac{\eta_e \cdot \eta_{\text{cir}}}{1 - \eta_{\text{coll}} + \eta_{\text{coll}}(\eta_e + \eta_{\text{int}})}, \quad (3)$$

其中 ΔP_f 代表作用完电子注中那些动能增加的少量电子从高频场获得的能量. 当 $p \leq 1 \mu\text{P}$ 时, $\Delta \approx 0.01$, 而当 $p > 1 \mu\text{P}$ 时, $\Delta \approx 0.02$.

Kosmahl 在建立模型时曾经假设各电极上耗散的能量都是相同的, 但是在实际的管子中这一条是不能成立的. 由于 MDC 中各电极的形状、所加电压以及产生的二次电子都不相同, 所以通常各电极上的损耗有很大差异, 因此建立更接近实际的能量耗散模型就十分必要. 本文通过建立更符合实际情况的作用完电子注能量分布模型来推导更为准确的 MDC 效率评估公式, 详细研究 MDC 各个电极上的能量耗散对其效率和管子总效率的影响, 给出 MDC 的最佳电极数选取公式.

2 耗散公差的介绍和作用完电子注等差三角能量分布模型的建立

可以说, MDC 各个电极上能量的耗散是很难用一个严格的式子来表示的, 为了研究的方便, 我们认为各个电极上损耗的归一化电流和电压都成等差数列, 其公差分别为

$$\Delta i = \Delta I / I_0, \Delta v = \Delta V / V_0, \quad (4)$$

而 $P_{\text{diss}} = \Delta i \cdot \Delta v$ 就称为 MDC 归一化的耗散公差, 后面都简称耗散公差. 有了耗散公差的概念, 我们就可以建立作用完电子注的等差三角能量分布模型来推导其效率和行波管总效率的评估公式, 新的三角能量分布曲线如图 1 所示.

图 1 中真实的能量分布曲线下方的面积表示的是相互作用后残余的功率, 而 E_{min} 则表示作用完

电子注中失去能量最多的那些电子开始出现反射时所对应的用管体电压归一化的 MDC 电极电压, 各个阴影小三角形的面积代表各个电极上耗散的能量, 而“小拖尾”面积则是指相互作用过程中的高频损耗能量. 为了推导评估 MDC 效率的新公式, 做出如下假设:

① 作用完电子注的能量分布曲线 $I(V)/I_0$ vs V/V_0 近似是一个三角分布;

② MDC 总共有 N 级, 但其中不包括处在阴极电位的一级;

③ MDC 各个电极上电流和电压的损耗都成等差数列排列, 公差如 (4) 式所示, 并设第一级上归一化的电流损耗为 $i_1 = I_1/I_0$, 电压损耗为 $v_1 = V_1/V_0$.

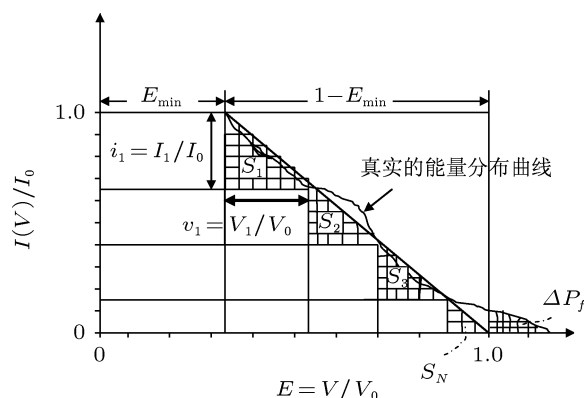


图 1 作用完电子注等差三角形能量分布曲线

与 Kosmahl 的假设相比, 内容不同的是第二和第三条, 第二条中不包括处在阴极电位的电极是为了数学处理的方便, 而第三条引入耗散公差的概念是为了使得模型与行波管的实际情况更为接近. 新模型中没有了二次电子发射系数 $\delta \ll 1$ 这一条假设, 这是因为引入了耗散公差的概念, 就可以将包括二次电子发射在内的所有损耗都考虑进去.

3 新评估公式的推导

在图 1 的模型中, 计算 MDC 中总的耗散能量, 实际上就是对各个阴影三角形的面积求和. 根据三角形面积公式可以得到下面简单的关系:

$$S_1 = i_1 v_1 / 2,$$

$$S_2 = (i_1 + \Delta i)(v_1 + \Delta v) / 2$$

$$= i_1 v_1 / 2 + (i_1 \cdot \Delta v + \Delta i \cdot v_1) / 2 + \Delta i \cdot \Delta v / 2, \quad (5)$$

⋮

$$S_N = [i_1 + (N - 1)\Delta i] [v_1 + (N - 1)\Delta v] = i_1 v_1 / 2 + (N - 1)(i_1 \cdot \Delta v + \Delta i \cdot v_1) / 2 + (N - 1)^2 \Delta i \cdot \Delta v / 2.$$

将 (5) 中的 N 个方程相加就得到所有阴影三角形面积的总和, 也就是 MDC 各个电极上耗散的能量总和.

$$S = S_1 + S_2 + \dots + S_N = \frac{N}{2} \cdot i_1 v_1 + \left[(N - 1) + \frac{(N - 1)(N - 2)}{2} \right] \times (i_1 \cdot \Delta v + \Delta i \cdot v_1) + \frac{[1^2 + 2^2 + \dots + (N - 1)^2]}{2} \Delta i \cdot \Delta v, \quad (6)$$

利用公式

$$1^2 + 2^2 + \dots + n^2 = \frac{1}{6} n(n + 1)(2n + 1) \quad (7)$$

就得到 MDC 各个电极上耗散的能量总和为

$$S = \frac{N}{2} i_1 v_1 + \frac{N(N - 1)}{4} (i_1 \cdot \Delta v + \Delta i \cdot v_1) + \frac{N(N - 1)(2N - 1)}{12} \Delta i \cdot \Delta v. \quad (8)$$

$$\eta_{\text{coll}} = \frac{\frac{1}{2}(1 + E_{\text{min}}) - \frac{1}{2N}(1 - E_{\text{min}}) - \frac{(N - 1)N(N + 1)}{24} \Delta i \cdot \Delta v}{\frac{1}{2}(1 + E_{\text{min}})} - \Delta = 1 - \frac{1}{N} \frac{1 - E_{\text{min}}}{1 + E_{\text{min}}} - \frac{1}{12} \frac{(N - 1)N(N + 1)}{1 + E_{\text{min}}} \Delta i \cdot \Delta v - \Delta. \quad (12)$$

对于纯粹的直流电子注, 优化之后电子注收集的效率最大为 97%, 因此 (12) 式又可以写成:

$$\eta_{\text{coll}} = 0.97 \times \left[1 - \frac{1}{N} \frac{1 - E_{\text{min}}}{1 + E_{\text{min}}} - \frac{1}{12} \frac{(N - 1)N(N + 1)}{1 + E_{\text{min}}} \Delta i \cdot \Delta v \right] - \Delta, \quad (13)$$

因为 (13) 式中的 E_{min} 必须通过程序计算得到, 要直接估计 MDC 效率, 必须将 E_{min} 用其他量代替. 为了达到上面的目的, 我们将 Kosmahl 文献中的曲线绘制出来得到图 2.

利用文献中的数据进行拟合, 得到 $f(p)$ 和 p 之

间的数值关系式如下:

$$N i_1 + \frac{N(N - 1)}{2} \Delta i = 1, \quad (9)$$

$$N v_1 + \frac{N(N - 1)}{2} \Delta v = 1 - E_{\text{min}}$$

得到

$$i_1 \cdot \Delta v + \Delta i \cdot v_1 = \frac{1 - N^2 \cdot i_1 v_1 - N^2(N - 1)^2 \Delta i \cdot \Delta v / 2 - E_{\text{min}}}{N^2(N - 1) / 2}. \quad (10)$$

将 (10) 式代入 (8) 式就得到

$$S = \frac{1}{2N} (1 - E_{\text{min}}) + \frac{(N - 1)N(N + 1)}{24} \Delta i \cdot \Delta v. \quad (11)$$

根据前面的分析, 真实能量曲线下方的面积代表相互作用后残余的能量, 我们将这个面积按照梯形的面积来计算, 因为阴影三角形面积代表 MDC 各电极上耗散的能量, 所以两者的差值再减去高频耗散部分的“小拖尾”面积, 自然就代表 MDC 可以回收的能量. 于是根据收集极效率的定义就得到该模型下 MDC 效率的表达式:

间的数值关系式如下:

$$f(p) = -0.00825p^3 + 0.1057p^2 - 0.40324p + 1.25473. \quad (14)$$

实际上 (1) 式中 $\Delta V/V$ 与 E_{min} 之间的关系满足下面的式子:

$$E_{\text{min}} = 1 - \Delta V/V = 1 - f \cdot \sqrt[3]{\eta_e \cdot p}, \quad (15)$$

将 (15) 式代入 (13) 式就得到:

$$\eta_{\text{coll}} = 0.97 \left(1 - \frac{1}{N} \frac{f \cdot \sqrt[3]{\eta_e \cdot p}}{2 - f \cdot \sqrt[3]{\eta_e \cdot p}} \right)$$

$$-\frac{1}{12} \frac{(N-1)N(N+1)}{2-f \cdot \sqrt[3]{\eta_e \cdot p}} \Delta i \cdot \Delta v) - \Delta. \quad (16)$$

行波管总效率的表达式与(3)式相同,但比较(2)和(16)两式,MDC效率 η_{coll} 的表达式中已经多了包含耗散公差 $\Delta i \cdot \Delta v$ 的项,第二项分母中的 $N-1$ 也因为新模型中的假设条件②而变成了 N .

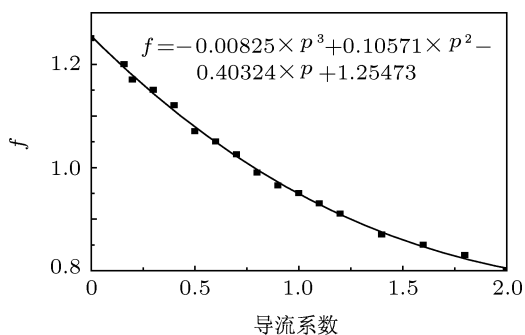


图2 $f(p)$ 和 p 之间的经验曲线

4 新评估公式的准确性分析

与(2)式相比,新的评估(16)式中多出了含有耗散公差的一项,这一项同样由MDC级数 N ,导流系数 p ,电子效率 η_e 和耗散公差 $P_{diss} = \Delta i \cdot \Delta v$ 共同决定.其中耗散公差 $P_{diss} = \Delta i \cdot \Delta v$ 的取值非

常关键,当 P_{diss} 大于零时,MDC各个电极上耗散的能量是逐级递增的,考虑到MDC第一级上收集的是速度最慢的电子,而设计者们对这些最慢的电子的能量分布“了解”得比其他能量的电子更为全面,可以设计MDC第一级使其能量耗散比第二级少,而第一级和第二级上的能量耗散是主要的.后面各个电极上虽然也存在耗散能量,但是由于到达后面电极上的能量已经少得多,所以耗散在总功率中所占比重就会小得多.当然耗散公差不能太大,各个电极上耗散能量越接近均匀,MDC的效率就会越高.

同时考虑到导流系数越高的管子,电子注中的空间电荷力就会越强,相应电子枪和相互作用区的结构就会越复杂,MDC也就会采取更多电极才会达到一个最优的收集效率.与导流系数低的管子相比,高导流系数的管子MDC级数更多,那么耗散也会更均匀一些,也就是耗散公差 P_{diss} 更小一些.基于上述两点考虑,耗散公差做如下选取:

$$P_{diss} = \begin{cases} 0.005, & p \leq 0.5 \mu P, \\ 0.003, & p > 0.5 \mu P. \end{cases} \quad (17)$$

利用(2)—(4)式和(14)—(17)式,用新旧两种公式对以下15只管子的MDC效率和总效率^[23,24]进行了评估,并将评估的结果与实测值进行了对照,见表1.

表1 新旧两种公式对15只管子效率的评估

No	μP	η_e	N	η_{cm}	η_{cold}	η_{cnew}	η_{ovm}	η_{ovold}	η_{ovnew}
1	0.410	0.1535	5	0.860	0.890	0.861	0.470	0.510 ^a	0.468 ^a
2	0.410	0.1535	4	0.840	0.865	0.853	0.440	0.475 ^a	0.458 ^a
3	0.410	0.1535	3	0.810	0.820	0.817	0.410	0.420 ^a	0.415 ^a
4	0.535	0.1960	5	0.860	0.880	0.859	0.510	0.525 ^b	0.502 ^b
5	0.535	0.1960	4	0.820	0.850	0.842	0.475	0.490 ^b	0.482 ^b
6	0.535	0.1960	3	0.795	0.795	0.793	0.440	0.435 ^b	0.433 ^b
7	0.470	0.1700	5	0.842	0.886	0.854	0.416	0.512 ^c	0.469 ^c
8	0.470	0.0370	5	0.874	0.920	0.892	0.186	0.238 ^c	0.198 ^c
9	0.470	0.0770	5	0.864	0.907	0.877	0.301	0.362 ^c	0.315 ^c
10	0.490	0.1950	5	0.843	0.880	0.848	0.480	0.536 ^c	0.496 ^c
11	0.400	0.1600	5	0.855	0.891	0.860	0.476	0.505 ^c	0.461 ^c
12	0.400	0.0240	5	0.919	0.928	0.901	0.185	0.181 ^c	0.147 ^c
13	0.400	0.1600	4	0.817	0.868	0.852	0.427	0.472 ^c	0.451 ^c
14	0.400	0.0360	5	0.904	0.922	0.894	0.255	0.236 ^c	0.196 ^c
15	1.230	0.2440	4	0.760	0.810	0.799	0.456	0.514 ^c	0.504 ^c

表 1 中 η_{cm} , η_{cold} , η_{cnew} 分别表示 MDC 效率的实测值、旧公式评估结果与新公式评估结果, 相应地 η_{ovm} , η_{ovold} , η_{ovnew} 分别表示管子总效率的实测值、旧公式评估结果与新公式评估结果. 表 1 中最后两列中的上标代表线路效率 η_{cir} 和前向截获率 η_{int} 的不同取值, 具体取值如下:

$$\begin{aligned} a: & \eta_{cir} = 0.86, \eta_{int} = 0.012, \\ b: & \eta_{cir} = 0.835, \eta_{int} = 0.019, \\ c: & \eta_{cir} = 0.85, \eta_{int} = 0.02, \end{aligned} \quad (18)$$

其中 a 和 b 两种情况下的 η_{cir} 和 η_{int} 的值是从文献中查到的, c 中的 η_{cir} 和 η_{int} 值在文献中没有找到, 因而是估计值. 为了更清楚地看到新公式评估的准确性, 我们将评估的结果绘制在图 3 和 4 中.

图 3 描述了新、旧两种公式对 MDC 效率的评估结果与实测值的对比情况. 从图中可以明显地看到, 旧公式 (2) 给出的评估结果要比实测值高, 这在 Kosmahl 1979 年的一篇文章中已经做了说明 [25]. 与 (2) 式对 MDC 效率的评估结果相比, (16) 式给出的评估结果虽然也比实测值偏高, 但与实测的结果更为接近. 至于表 1 上标 c 系列中编号为 12 和 14 的两只管子 MDC 效率的实测值比新公式的评估值高的原因是耗散公差取得过大, 因为对于收集效率很高的 MDC 来讲, 各个电极上耗散能量是比较均匀的, 也就是耗散公差一定比较小的, 要低于我们在评估时使用的耗散公差值 0.005. 而对于表 1 的上标 b 系列中编号为 6 的管子 MDC 效率的测量值比新公式的预测值略高则有可能是耗散公差取得偏大而导致, 也可能是由运算过程中的近似而引起的. 总的说来, 新公式 (16) 对 MDC 效率给出了更为准确的评估.

新、旧两种公式对行波管总效率的评估情况绘制在图 4 中. 相比较而言, 新公式给出了更为接近测量值的评估结果. 有几点需要说明的是, 在表 1 上标 c 系列中编号为 14 的管子的测量值比旧公式和新公式预测的结果都要高, 这是因为该管子的线路效率 η_{cir} 和前向截获率 η_{int} 都是估计值, 这个估计值可能与真正的实测值相差较大, 如果能够获得更为准确的线路效率 η_{cir} 和前向截获率 η_{int} 的测量值, 评估结果一定会和实测值更为符合; 而表 1 上标 b 系列中编号为 6 的管子总效率的测量值比新、旧两种公式的预测结果都要高则是因为新公

式和旧公式都是通过 MDC 效率来预测行波管的总效率, 而在 MDC 效率较低的情况下, 电子效率、线路效率和前向截获率等因素对行波管总效率的影响就会加大, 则基于 MDC 效率的总效率预测公式给出的预测结果就会产生较大误差; 至于图中出现的测量值比旧公式估计值偏低而比新公式估计值偏高的情况 (对应于表 1 上标 c 系列中编号为 11 的管子), 则还是因为耗散公差 P_{diss} 选得太大的缘故.

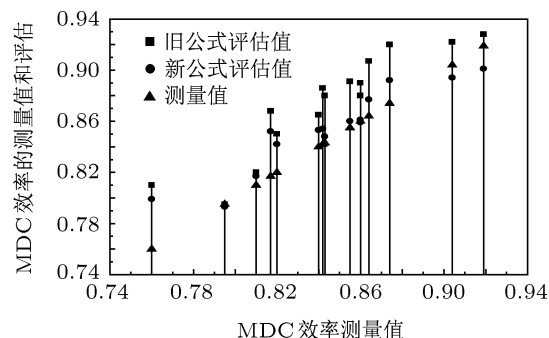


图 3 新旧两种公式对 MDC 效率的评估

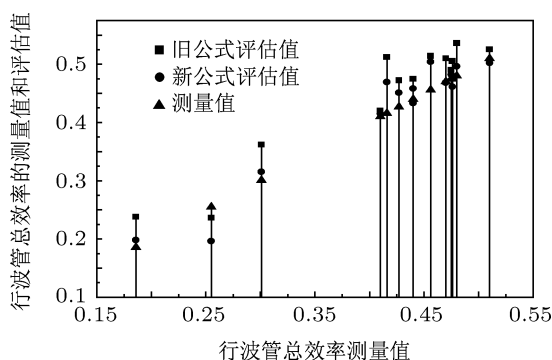


图 4 新旧两种公式对行波管总效率的评估

5 耗散公差对 MDC 效率和总效率的影响

从第 4 节的论述我们可以知道新的评估公式能够给出更接近实测值的估算结果. 新公式 (16) 中最重要的就是引入耗散公差 P_{diss} 来分析 MDC 各个电极上能量耗散的差异, 而这个差异对 MDC 的效率, 乃至总效率都有重要影响.

5.1 确定级数的 MDC 内耗散公差的影响

在同一个五级 MDC 内, P_{diss} 对效率的影响曲

线绘制在图 5 和 6 中.

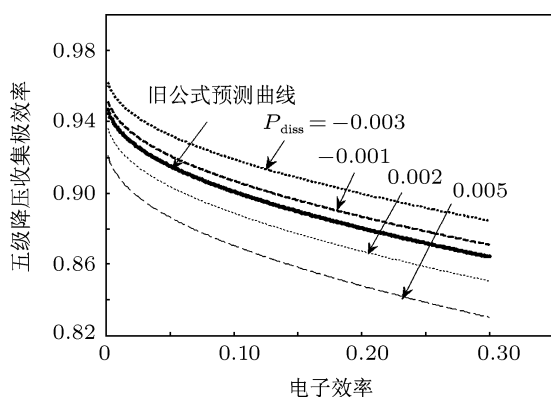


图 5 不同的耗散公差下, 五级降压收集极效率随电子效率的变化 (该管子导流系数为 $p = 0.47$)

从图 5 中可以看出, 当耗散公差 P_{diss} 大于零时, 新公式给出的 MDC 效率的估计值要低于旧公式的估计值, 而且随着其值的变大降低的幅度也越来越大, 同时在同样的耗散公差下, 随着电子效率 η_e 的增加, 这种降低的幅度也会越来越大; 而当 P_{diss} 小于零时, 新公式给出的估算值要高于旧公式的评估值, 也就是更多地偏离了实际测量值. 这同时也启发我们, 要使管子 MDC 有更高的收集效率, 可以让各个电极上的能量耗散成一个递减的等差数列, 这也就是说要想使 MDC 的效率提高, 最后一个电极上的能量耗散一定是越少越好, 实际 MDC 各个电极上的耗能情况是前三级上耗散的能量是最多的, 当然这也与电极上所加电压有关, 但是在兼顾高收集效率和低返流率的情况下, 各个电极上所加电压是有一定要求的.

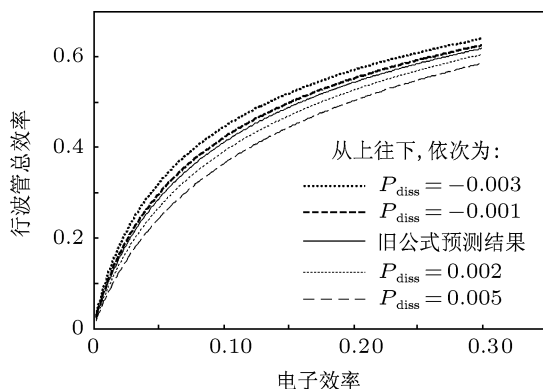


图 6 不同耗散公差下, 行波管总效率随电子效率的变化曲线 (行波管导流系数 $p = 0.47$, 电路效率 $\eta_{cir} = 0.85$, 截止比 $\eta_{int} = 0.02$)

从图 6 中可以看到, 在同样的五级 MDC 内, 当耗散公差 P_{diss} 大于零时, 新公式给出的估算值要

低于旧公式的预测结果, 而且随着 P_{diss} 的增加这种降低的幅度也在增大. 与图 5 不同的一点是在同样的耗散公差下, 新公式与旧公式预测结果的差异随着电子效率的增加而变化不大, 尤其是当电子效率 η_e 大于 0.25 之后, 两者的差异基本不受电子效率增加的影响. 这就说明随着电子效率 η_e 的增加, 影响行波管总效率的主要因素逐渐成为电子效率 η_e 而非 MDC 效率 η_{coll} . 这从物理上也比较容易理解, 电子效率 η_e 表征的是电子注的直流功率转化为高频功率的效率, 电子效率的提高直接就会导致管子总效率的提高, 而 MDC 效率对总效率的影响虽然十分重要, 但却是间接的影响, 也就是说即便 MDC 的效率再高, 但是如果不能转化为高频的功率 (也就是电子效率很低), 那么总效率也不会提高. 当耗散公差小于零时, 新公式的评估值要高于旧公式的评估值, 而且耗散公差的绝对值越大, 给出的评估值越高; 而当耗散公差的绝对值很小时, 估计出的行波管总效率可能会大于 1, 这显然是不合理的, 所以一般情况下的耗散公差应该为一个在 0—0.005 之间的正值.

5.2 不确定级数 MDC 内耗散公差的影响

5.1 节讨论了 MDC 级数确定的情况下, 耗散公差的影响. 这一节要研究在导流系数、电子效率和耗散公差都发生变化时, MDC 效率和总效率的变化情况.

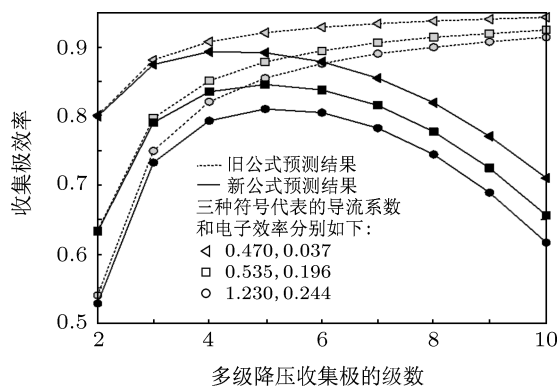


图 7 多级降压收集极效率随其降压级数的变化曲线

图 7 表示了在不同导流系数和电子效率的情况下, MDC 效率随其电极级数的变化情况. 从图中可以很明显地看出, 旧公式的预测值随着 MDC 级数的增加一开始大幅度增加, 之后趋于平缓. 一般

情况下在确定 MDC 级数的时候,当 MDC 效率的提升很微小时,我们就不再增加 MDC 的级数,因为 MDC 级数的选取实际上是其效率提升和降低能量损耗与原始功率节省之间博弈的结果,我们总是希望在功率消耗尽量小的前提下得到一个比较高的收集效率,而增加电极级数会增加原始功率的损耗,造成能量的浪费.与旧公式的预测趋势不同,新公式的预测曲线上出现了一个拐点,在此拐点之后,MDC 的效率随着电极级数的增加不是升高而是降低了,这实际上就是因为每一个电极上的能量耗散是在逐渐增加的原因(因为在这里我们取耗散公差的值 $P_{diss} = 0.005$).而拐点处给出的 MDC 的级数与实际的优化之后所选的电极数量是一致的.这也就是说新公式可以给出一个确定的 MDC 电极数,使得取该电极数时的 MDC 效率最高而且耗费能量最少,这个确定关系将在后面的章节中给出.同时,在 MDC 级数确定之后,其效率随着行波管导流系数的升高而降低,这就说明导流系数越高,空间电荷效应就越强,相同电极结构的情况下达到较高的收集效率也就越困难.

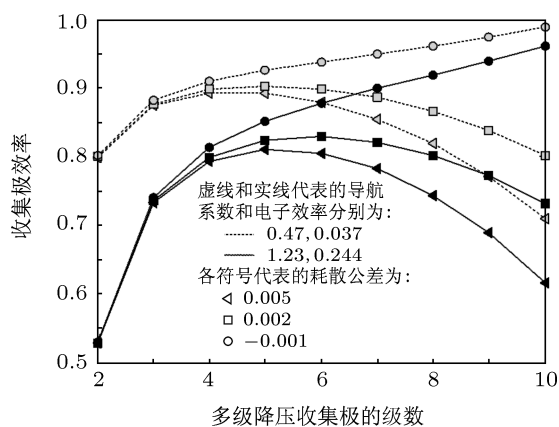


图8 耗散公差不同时, MDC 效率随其级数的变化

当耗散公差 P_{diss} 不同时, MDC 效率随其级数的变化显示在图 8 中.与图 7 相同之处是导流系数越高,确定级数的 MDC 的效率就会越低,原因在前面已经说明.而且当耗散公差 P_{diss} 大于零时, MDC 效率随着其电极级数的增加出现了一个拐点,这与图 7 中的情况是相同的.不同之处是当耗散公差 P_{diss} 小于零时, MDC 效率随其级数的增加不再出现拐点,而是与旧公式的预测曲线相似,逐渐趋于平缓.但是当导流系数增加的时候, MDC 效率随

其级数的增加会增加得比较快,当电极级数增加到较大值时, MDC 的效率可能会迅速增加而接近 1,这是因为当导流系数较大时,空间电荷力大大加强,对电子注的约束和控制就愈发困难,这时 MDC 效率的提高就要更多地依赖于 MDC 电极级数的增加,同时因为耗散公差的绝对值越大,各个电极上的能量耗散就减小得越快,直至在最后一级电极上能量耗散趋近于零,相应地 MDC 回收的能量就越多,其效率也就会迅速增加.但这与管子的实际情况是有差异的,实际的管子中由于存在二次电子的发射以及作用完电子速度分类的不完全,各个电极上的能量损耗不可能严格控制,而且尽量减少作用完电子注的能量损耗有时是需要增加原始功率的损耗和电源结构的复杂性,因此实际管子都是这两者之间的一种平衡,而不可能像预测的那样将效率无限制地提高.

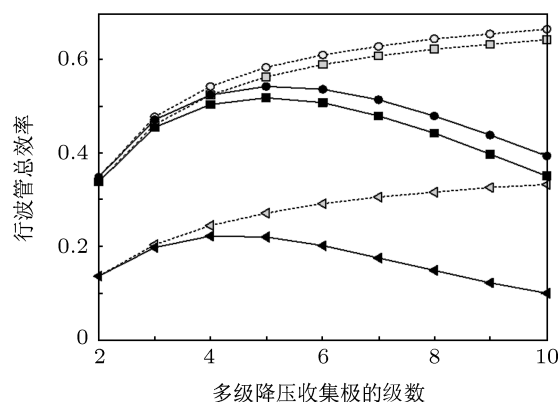


图9 行波管总效率随 MDC 级数的变化曲线

行波管总效率随 MDC 电极级数的变化曲线如图 9 所示,曲线和符号的含义与 7 相同:虚线代表旧公式预测结果,实线代表新公式预测结果,三角代表导流系数和电子效率分别为 $0.47 \mu P$ 和 3.7% ,方块代表导流系数和电子效率分别为 $0.535 \mu P$ 和 19.6% ,而小圆代表的导流系数和电子效率分别为 $1.23 \mu P$ 和 24.4% ,耗散公差 $P_{diss} = 0.005$.从图中可以清楚地看到,随着电子效率和导流系数的增加,行波管的总效率增加很快,这是与图 7 的不同之处.在图 7 中导流系数越大,相同电极数的 MDC 能给出的收集效率就越低,而在图 9 中,电子效率越高和导流系数越高,行波管的总效率就会越高.这就说明行波管的总效率与导流系数与电子效率都有密切的关系,而 MDC 的效率受导流系数的影

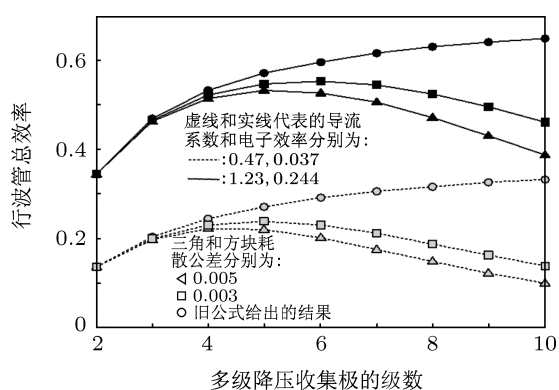


图 10 在耗散公差不同时, 总效率随收集极级数的变化曲线 (图中线路效率 $\eta_{\text{cir}} = 0.85$, 截获比 $\eta_{\text{int}} = 0.02$)

响较大, 电子效率对其影响要小很多. 图 9 与图 7 的相同之处是, 旧公式对总效率的评估曲线没有给出拐点, 但是新公式对总效率的评估曲线出现了拐点, 由这个拐点给出的 MDC 电极的级数与图 7 中拐点给出的电极级数是相同的. 这就说明, 虽然 MDC 的级数对其效率的影响要大于对行波管总效率的影响, 但是由总效率也同样可以给出 MDC 的最佳电极数, 这也就说明 MDC 效率对行波管总效率的影响特别关键.

另外值得注意的是, 旧公式显示随着 MDC 级数的无限增加, 行波管的总效率会无限制地提高, 这是不符合实际情况的. 在实际的管子中, 当 MDC 的电极数无限增加的时候, 电源的复杂性和必须提供的原始功率就会大大增加, 这反过来会限制管子总效率的提高, 同时管子的总效率还受到诸如电子效率、线路效率、前向截获效率和返流等等因素的影响, 当 MDC 的级数无限制增加的时候, 这些效率之间的矛盾就会很快凸显出来, 阻碍行波管总效率的进一步提高. 从这个角度来讲, 新公式的评估更符合管子的实际情况.

图 10 表示耗散公差不同时, 行波管总效率随 MDC 电极级数的变化曲线. 在相同的 MDC 级数的情况下, 耗散公差越大, 给出的总效率就会越低, 这与图 6 中显示的结论是相同的. 值得注意的是, 旧公式评估结果与新公式在不同耗散公差时的评估结果之间的差异在 MDC 电极级数小于三级的時候很不明显, 随着电极级数的增加, 这种差异逐渐增大. 同样新公式给出的曲线能够读出 MDC 的最佳电极数, 这是旧公式里面没有的.

6 MDC 中最佳电极级数的选取

前面的分析中得到一个结论: 新公式给出的预测曲线出现一个拐点, 从这个拐点可以得到 MDC 最佳的电极级数. 下面我们就来求这个最佳电极数的表达式.

我们知道, 设计 MDC 的目的主要就是希望收集效率 η_{coll} 达到最大, 同时各个电极上的能量耗散达到最小值, 从能量的角度进行分析, 这两个极值点应该是重合的. 在前面的分析中, 我们认为图 1 中每一个电极上耗散的电流和电压都成等差数列, 其公差分别为 Δi 和 Δv , 从中得到能量耗散公差 $\Delta i \cdot \Delta v$. 在本节的讨论中为了直接和能量挂钩, 我们设第一电极上耗散的功率为 $i_1 v_1$, 以后各个电极上耗散的功率成等差数列, 其公差就是我们前面提到的耗散公差 $\Delta i \cdot \Delta v$, 由此就得到所有电极上的总耗散功率为

$$P_{\text{disstotal}} = N \cdot i_1 v_1 + \frac{N(N-1)}{2} \cdot \Delta i \cdot \Delta v. \quad (19)$$

若将 (19) 式对 N 求一阶导数并令其等于零, 就得到耗散能量最小时 MDC 的电极级数, 即

$$\frac{dP_{\text{disstotal}}}{dN} = i_1 v_1 + \frac{2N-1}{2} \Delta i \cdot \Delta v = 0. \quad (20)$$

要使 MDC 的效率最大, 必须使得 (16) 式对 N 的一阶导数值为零, 即可以得到如下的式子:

$$d\eta_{\text{coll}}/dN = 0, \quad (21)$$

或者写成

$$0.97 \left(\frac{1}{N^2} \frac{f \cdot \sqrt[3]{\eta_e \cdot p}}{2 - f \cdot \sqrt[3]{\eta_e \cdot p}} - \frac{3N^2 - 1}{12(2 - f \cdot \sqrt[3]{\eta_e \cdot p})} \Delta i \cdot \Delta v \right) = 0. \quad (22)$$

求解 (20) 和 (22) 式就得到:

$$\begin{cases} N(\eta_e, p, P_{\text{diss}}) = \sqrt{\sqrt{\frac{4f \cdot \sqrt[3]{\eta_e \cdot p}}{P_{\text{diss}}} + \frac{1}{36}} + \frac{1}{6}} \\ i_1 v_1 = -\frac{2N-1}{2} P_{\text{diss}} \end{cases} \quad (23)$$

从 (23) 式中可以看出, MDC 的最佳电极数与导流系数 p , 电子效率 η_e 和耗散公差 P_{diss} 都有关系, 大概的比例关系是最佳电极数 N 与导流系数 p 和电子效率 η_e 成正比, 而随着耗散公差 P_{diss} 的增加, 最

佳电极级数减小。

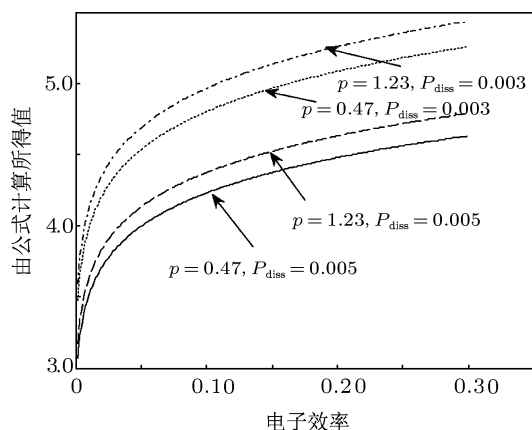


图 11 在不同导流系数和耗散公差的情况下, (23) 式中第一式的预测值随电子效率的变化

图 11 表示出了在不同导流系数和耗散公差的情况下, (23) 式中第一式的预测值随电子效率的变化曲线. 从图中可以看出, 耗散公差对 MDC 电极级数的影响很大, 随着耗散公差的降低, 最佳电极级数在变大. 但是在这里耗散公差 P_{diss} 不能取得太小, 因为当耗散公差 P_{diss} 趋近于零时, 最佳 MDC 级数趋于无穷, 这是不符合实际情况的, 所以耗散公差 P_{diss} 一般取值在 0.002—0.005 之间. 在相同耗散公差的情况下, 导流系数越高, 最佳电极级数越多. 电子效率虽然也对 $N(\eta_e, p, P_{\text{diss}})$ 有影响, 但是随着电子效率的增加, $N(\eta_e, p, P_{\text{diss}})$ 的值只是略

有增加. 通过分析我们可以通过下面的式子来确定 MDC 的最佳电极数:

$$N_{\text{opt}} = \text{int} [N(\eta_e, p, P_{\text{diss}})] \quad (24)$$

$\text{int} [N(\eta_e, p, P_{\text{diss}})]$ 表示取不超过 $N(\eta_e, p, P_{\text{diss}})$ 的最大整数, 其中电子效率 η_e 和导流系数 p 在相互作用之后都是已知的, 耗散公差 P_{diss} 一般取值在 0.002—0.005 之间, 当 MDC 的最佳电极数确定下来之后, 将 (25) 式代入 (23) 式的第二式就得到第一级的能量耗散 $i_1 v_1$.

针对不同导流系数和电子效率的 15 只管子, (23) 和 (24) 式对其 MDC 最佳电极数的预测值列于表 2 中. 表 2 中耗散公差 P_{diss} 的选取与 (17) 式相同, N, N_{opt} 分别指由 (23) 式的第一式和 (24) 式计算所得值, 而 N_m 指实际管子中使用的 MDC 电极数. 从表 2 中我们可以看出, 在导流系数和电子效率相同的情况下, 采用由公式预测的电极数时, MDC 效率是最高的, 如表 2 中编号为 1, 2 和 3 的三只管子所示; 对于编号为 4, 5 和 6 的三只管子, 若 MDC 电极数选为 6 级则其效率会更高; 对于编号为 7—13 的管子, 公式预测值与实际值完全符合, 也都给出了较高的收集效率; 而对于编号为 14 和 15 的两只管子则因为没有采用公式预测的最佳电极数, 因而 MDC 的效率相对较低.

表 2 最佳电极选取公式对实际管子 MDC 电极数的预测

No	μP	η_e	N	N_{opt}	N_m	η_{cm}
1	0.410	0.1535	5.45	5	5	0.860
2	0.410	0.1535	5.45	5	4	0.840
3	0.410	0.1535	5.45	5	3	0.810
4	0.535	0.1960	6.14	6	5	0.860
5	0.535	0.1960	6.14	6	4	0.820
6	0.535	0.1960	6.14	6	3	0.795
7	0.470	0.1700	5.43	5	5	0.842
8	0.470	0.0370	5.43	5	5	0.874
9	0.470	0.0770	5.43	5	5	0.864
10	0.490	0.1950	5.42	5	5	0.843
11	0.400	0.1600	5.46	5	5	0.855
12	0.400	0.0240	5.46	5	5	0.919
13	0.400	0.0360	5.46	5	5	0.904
14	0.400	0.1600	5.46	5	4	0.817
15	1.230	0.2440	5.89	5	4	0.760

7 结论

提高行波管效率是行波管设计者们孜孜以求的目标,而 MDC 效率的提高对行波管总效率的提高具有十分重要的作用.在设计 MDC 之前对其效率和行波管总效率进行准确的评估可以增加设计的目的性和针对性,这不仅可以节省计算资源和时间,而且对 MDC 的优化设计具有十分重要的意义.与 Kosmahl 的评估公式相比,本文的结果具有以下几个优点:

- 1) 作用完电子注的等差三角能量分布模型比 Kosmahl 的能量分布模型更接近实际情况;
- 2) 新公式对 MDC 效率和行波管总效率的评估

都更接近实测值;

3) 新公式通过引入耗散公差的概念,可以详细地研究 MDC 各个电极上的能量耗散对其效率和行波管总效率的影响,而这在 Kosmahl 的评估公式中是不可能进行的;

4) 新公式通过应用 MDC 效率最高和各个电极上能量耗散最小这两个极值条件得到了最佳电极数的选取公式,该公式给出了合理和准确的预测结果,这在 Kosmahl 的评估公式中是没有的.

综合上述四点,本文的研究完善了 Kosmahl 的评估公式,对于更好地优化 MDC、进一步提高行波管总效率和改善其性能具有积极的意义^[26,27].

-
- [1] Xie H Q, Li C Y, Yan Y, Liu S G 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 914 (in Chinese) [谢鸿全, 李承跃, 鄢扬, 刘盛纲 2003 物理学报 **52** 914]
 - [2] Gao P, Booske J H, Yang Z H, Li B, Xu L, He J, Gong Y B, Tian Z 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8484 (in Chinese) [高鹏, Booske John H, 杨中海, 李斌, 徐立, 何俊, 宫玉彬, 田忠 2010 物理学报 **59** 8484]
 - [3] Peng W F, Hu Y L, Yang Z H, Li J Q, Lu Q R, Li B 2011 *Chin. Phys. B* **20** 028401
 - [4] Duan Z Y, Gong Y B, Wei Y Y, Wang W X 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2484
 - [5] Chernin D, Antonsen T M, Levush J B, Whaley D R 2001 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **48** 3
 - [6] Lai G J, Liu P K 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 321 (in Chinese) [来国军, 刘濮鲲 2006 物理学报 **55** 321]
 - [7] 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]
 - [8] Chua C, Tsai J M, Aditya S, Tang M, Ho S W, Shen Z X, Wang L 2011 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **58** 4098
 - [9] Li F, Xiao L, Liu P K, Yi H X, Wan X S 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 097901 (in Chinese) [李飞, 肖刘, 刘濮鲲, 易红霞, 万晓声 2011 物理学报 **60** 097901]
 - [10] Peng W F, Yang Z H, Hu Y L, Li J Q, Lu Q R, Li B, 2011 *Chin. Phys. B* **20** 078401
 - [11] Komm D S, Benton R T, Limburg H C, Menninger W L, Zhai X L 2001 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **48** 174
 - [12] Ramins P, Fox T A August 1981 NASA Technical Paper-1832
 - [13] Yi H X, Xiao L, Liu P K, Hao B L, Li F, Li G C 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 068403 (in Chinese) [易红霞, 肖刘, 刘濮鲲, 郝保良, 李飞, 李国超 2011 物理学报 **60** 068403]
 - [14] Hu Y L, Yang Z H, Li B, Li J Q, Huang T, Jin X L, Zhu X F, Liang X P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5439 (in Chinese) [胡玉禄, 杨中海, 李斌, 李建清, 黄桃, 金晓林, 朱小芳, 梁献普 2010 物理学报 **59** 5439]
 - [15] Ramins P 1984 NASA Technical Paper-2248
 - [16] Kosmahl H G 1971 *NASA Tech. Note* TN-D-6093
 - [17] Hechtel J R 1977 *IEEE Trans. Electron Dev.* **24** 45
 - [18] Okoshi T 1972 *IEEE Trans. Electron Dev.* **19** 104
 - [19] Dunn D A, Borghi R P, Wadat G 1960 *IRE Trans. Electron Dev.* **7** 262
 - [20] Chen T S, Wolkstein H J, Memurrough R W 1963 *IEEE Trans. Electron Dev.* **10** 243
 - [21] Kosmahl H G 1982 *Proc. IEEE* **70** 1325
 - [22] Kosmahl H G 1980 *IEEE Trans. Electron Dev.* **27** 526
 - [23] Guo K K 2008 *Traveling wave tubes development technology* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) (in Chinese) [郭开周 2008 行波管研制技术 (北京: 电子工业出版社)]
 - [24] Dayton J A, Kosmahl H G, Ramins P, Stankiewicz N 1981 *IEEE Trans. Electron Dev.* **28** 1480
 - [25] Kosmahl H G 1979 *IEEE Trans. Electron Dev.* **26** 156
 - [26] Du C H, Liu P K, Xue Q Z 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4612 (in Chinese) [杜朝海, 刘濮鲲, 薛谦忠 2010 物理学报 **59** 4612]
 - [27] Santra M, Kumar L, Balakrishnan J 2011 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **58** 4087

Study on estimating efficiency of multistage depressed collector in traveling wave tubes*

Li Fei^{1)2)†} Xiao Liu¹⁾ Liu Pu-Kun¹⁾ Yuan Guang-Jiang¹⁾
Yi Hong-Xia¹⁾²⁾ Wan Xiao-Sheng¹⁾²⁾

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

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

(Received 23 September 2011; revised manuscript received 24 October 2011)

Abstract

In a traveling wave tube, efficiency of multistage depressed collector (MDC) is very important because it is closely related to total efficiency. The correct estimate of the efficiencies of MDC and TWT can help us predict TWT's whole function and provide a theoretical guidance for developing pertinent software, which therefore plays an important role in optimizing MDC and improving TWT total efficiency. Although formula for predicting MDC efficiency was given by Kosmahl in 1980, whose estimation is much higher than the measured value, a more accurate formula is still necessary. Firstly, the concept of "dissipated common difference" is used in this paper to estimate the efficiencies of MDC and TWT and then new estimate formulas are obtained by making a model of arithmetic triangular energy distribution for spent beam. It is expected that new formulas give predictions closer to the measured values than the Kosmahl's evaluation. Finally, expression for optimal MDC electrodes is given on the basis of two extreme values, i.e., maximal MDC efficiency and minimal total dissipated energies on all electrodes. The prediction from the expression is reasonable and accurate.

Keywords: multistage depressed collector, dissipated common difference, arithmetic triangular energy distribution, efficiency

PACS: 29.20.Ba, 29.27.Bd, 31.15.xg

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60931001) and the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60801030, 60871054).

† E-mail: lifei_00912@126.com