

用相速跳变提高行波管的效率*

陈培龙

摘 要

本文介绍一项提高行波管效率的研究工作, 研究的目的是使电子作用效率大于 25%, 采用的方法是“相速负渐变”。经过八种方案的试验, 电子效率从原来的均匀螺旋管的 13% 提高到了 29.8%, 效率改善了 2.3 倍。采用单级降压收集极后, 管子的总效率(包括热子功率在内)达到了 41% 以上。在分析试验结果的基础上, 提出了一套设计计算和实验验证相速负渐变管的方法。

一、前 言

采用相速负渐变技术可使已失去同步的电子注在进入收集极之前再次获得同步。因而, 它对提高行波管的电子作用效率来说是一项很有效的措施。J. E. Rowe^[1] 首先采用“硬核群”模型讨论了“相速负渐变”提高效率的问题, 并作了一系列试验, 证实了相速负渐变确实能提高管子的电子作用效率。

O. Sauseng^[3] 用类似于田丙耕和 J. E. Rowe 的大信号计算机程序, 对“相速跳变”和“电压跳变”的形式作了分析, 提出了一些设计准则, 也得到实验证实。

我们从获得再同步的要求出发, 并考虑到制管工艺上的一些实际问题, 决定采用阶梯式跳变螺距的形式来作试验。慢波结构的形式如图 1 和图 2 所示。

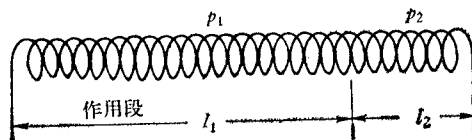


图1 一阶跳变慢波结构

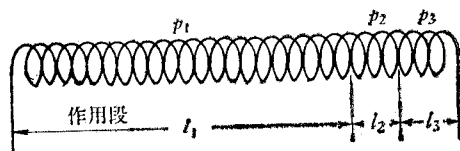


图2 二阶跳变慢波结构

对上述慢波结构必须决定下列几个设计参量。

* 1978年8月4日收到。

- (1) 相速跳变的起始位置以及作用段的工作状态.
- (2) 跳变段的长度.
- (3) 跳变段内相速变化的幅度.

对上述三个设计参量的选择在文献中只提到了一些原则,而且,文献的作者是从不同的角度来分析的,其中还有一些看法是不统一的.

为了确定跳变段内相速变化的幅度和最佳跳变段的长度,我们决定先做一只“短管”.所谓“短管”就是比原先做的长 240 mm 的管子短 40 mm 的均匀螺旋管.目的是看它的电气性能是否能达到一般均匀螺旋管的指标,同时可与以后加接跳变段螺旋线的管子作比较.

二、高效率试验及分析

(一) “短管”试验

1. “短管”螺旋线的几何尺寸:

$2a' = 3 \text{ mm}$, $p = 0.76 \text{ mm}$, $\delta = 0.3 \text{ mm}$ (铅丝) 螺旋线长度 $l = 200 \text{ mm}$, 管壳内径为 6.5 mm, 夹持杆为石英棒.

2. “短管”所达到的电气性能:

$$\begin{cases} V_f = 7\text{V} \\ I_f = 0.55 \text{ A} \end{cases} \quad \begin{cases} V_c = 2000 \text{ V} \\ I_c = 45 \text{ mA} \end{cases} \quad \begin{cases} V_H = 2375 \text{ V} \\ I_H = 5 \text{ mA} \end{cases}$$

在 $f_0 = 2.8 \text{ GHz}$ 时

$P_{0\max} = 16\text{W}$, $G_{\text{sat}} = 34.26 \text{ dB}$, $\eta_{\text{emax}} = 13.5\%$, $G_{\text{ss}} = 44.66 \text{ dB}$. ($V_H = 2050 \text{ V}$ 时, 增益最大.)

(二) 高效率试验的结果

上述测试结果说明,我们所做的“短管”是成功的,可以在此基础上加接相速负渐变的螺旋线.根据已掌握的一些原则,我们试验了七种不同的方案,大部份均提高了电子作用效率.

在我们的试验中,螺旋线平均直径 $2a' = 3' \text{ mm}$ 始终不变,管壳内径为 6.5 mm,均采用石英棒作夹持杆,作用段的长度 l_i 均固定为 200 mm 不变,与“短管”螺旋线的长度相同.

现把方案情况与试验结果列在表 1 中.

(三) 试验结果的分析

为了搞清各次试验中出现的问题,我们对以上七次试验的结果进行了反计算.计算工作主要是利用我们对实际螺旋线结构的相速计算公式^[5]来核算各段螺旋线的相速,从而求出以电压表示的相速跳变量,以及跳变段长度的波长数.计算结果列于表 2 中.

现对所得结果加以分析讨论.

1. 工作频带偏移问题

在第一次试验中,工作频带移到了低频处.原来希望中心频率 $f_0 = 2.8\text{GHz}$ ($\gamma_1 a' = 1.04$),但实际上偏移到 1.5GHz 处去了.由反计算知道,这时的 $\gamma_1 a'$ 和 $\gamma_2 a'$ 均小于 0.7.这种现象在 J. E. Rowe^[2] 以及 K. B. Niclas^[6] 等的试验中均出现过.我们对这种现象的解释如下:

表 1

次 数	参 量 管 号	参 量							
		$p_1(\text{mm})$	$p_2(\text{mm})$	$p_3(\text{mm})$	$l_2(\text{mm})$	$l_3(\text{mm})$	$V_H(\text{V})$	$\eta_{\text{max}}(\%)$	$f(\text{GHz})$
1	1—12	0.76	0.68		42		2370	25	1.5
	1—14	0.76	0.68		35		2170	18.2	1.7
	1—10	0.76	0.68		28		2270	18	1.7
2	2—17	0.86	0.76		42		2490	19.75	2.6
	2—16	0.86	0.76		35		2350	20.9	2.9
3	3—25	0.92	0.74		21		2900	10.3	2.9
4	4—30	0.86	0.80	0.74	20	20	2350	21.1	2.4
	4—31	0.86	0.80	0.74	20	20	2300	22	2.4
5	5—35	0.93	0.85	0.76	20	20	2900	24	2.8
6	6—36	0.90	0.81	0.74	20	20	2600	24.5	2.7
7	7—37	0.91	0.85	0.71	20	20	2650	17.15	2.9

这是因为采用减小跳变段的螺距来获得速度再同步所造成的。由于作用段的螺距维持不变,跳变段的螺距减小了,这就导致跳变段的 $\gamma a'$ 值增大,从而使跳变段的耦合阻抗 K 和增益参量 C 下降,结果便不能充分发挥跳变段的作用。这样,在中心频率处效率的提高就受到了较大的限制。只有当频率下降时, $\gamma a'$ 值才会下降,耦合阻抗才会增加,跳变段的作用才能得到充分的发挥,结果最大效率就出现在低频处了。为了增加跳变段的耦合阻抗,作用段必须工作在比一般均匀螺线管更低的 $\gamma_1 a'$ 值下,我们在试验的初期阶段中未考虑到这一点,因而出现了频偏问题。这是一条很根本的规律,在以后的几次试验中我们注意了这个问题,中心频率就上移了。

因为 $2a'$ 等均是固定的,所以减小 $\gamma_1 a'$ 的唯一办法就是增大螺距 p ,这就必然导致工作电压的增加。从整个试验的情况来看,作用段的 $\gamma_1 a'$ 值以取在 0.7—0.9 之间为佳。

2. 作用段的非同步参量 b_1 值问题

从各次试验核算的结果来看,实际的螺线电压 V_H 总是很接近于作用段的以电压表示的冷相速 V_1 。这意味着采用相速阶梯式跳变时,只有在作用段的非同步参量 b_1 值在零附近时,即 $b_1 \approx 0$, 才能获得最大的效率改善。这个结论是与 O. Sauseng^[3] 的计算机分析结果相一致的。

在文献 [3] 中, O. Sauseng 给出了典型管子条件在饱和时的基波与谐波电子注调制电流的计算值作为速度参量 b 的函数的曲线。如图 3 所示。

由图可知,饱和时基波注调制电流的幅度随着 b 值的减小而增加,直到“最佳注群聚电压”时达到最大(此时 $b \approx 0$)。此电压比最大增益电压稍低。在速度再同步情况下,作用段的“最佳注群聚电压”给出了最大的效率提高。因为基波注调制电流是电子注中唯一能将能量转换到慢波回路的分量。

表 2

次数	参 管 号	f (GHz)	V_H (V)	η_{em}^{max} (%)	V_1 (V)	V_2/V_1 (%)	V_3/V_1 (%)	$\gamma_{1d'}$	$\gamma_{2d'}$	$\gamma_{3d'}$	λ_{g1} (mm)	λ_{g2} (mm)	λ_{g3} (mm)	N_2	N_3
1	1-12	1.5	2370	25	2070	78.2		0.525	0.593		17.92	15.89		2.64	
	1-14	1.7	2170	18.2	2150	74		0.582	0.677		16.19	13.91		2.52	
	1-10	1.7	2270	18	2150	74		0.582	0.677		16.19	13.91		2.01	
2	2-17	2.6	2490	19.75	2440	76.5		0.838	0.956		11.24	9.85		4.26	
	2-16	2.9	2350	20.9	2370	76		0.947	1.082		9.93	8.7		4.02	
3	3-25	2.9	2900	10.3	2760	62.2		0.876	1.112		10.74	8.45		2.48	
	4-30	2.4	2350	21.1	2470	85.8	72.1	0.767	0.828	0.905	12.28	11.38	10.4	1.76	1.92
4	4-31	2.4	2300	22	2470	85.8	72.1	0.767	0.828	0.905	12.28	11.38	10.4	1.76	1.92
	5-35	2.8	2900	24	2860	82.1	64	0.831	0.917	1.04	11.32	10.28	9.05	1.945	2.19
6	6-36	2.7	2600	24.5	2680	79.5	65	0.828	0.93	1.031	11.38	10.12	9.13	1.975	2.19
	7-37	2.9	2650	17.15	2700	85.8	57.4	0.888	0.955	1.17	10.6	9.86	8.05	2.03	2.49

注: 表中所用的 V_1 、 V_2 、 V_3 分别代表以电压表示的第一、二、三段螺旋线的冷相速。

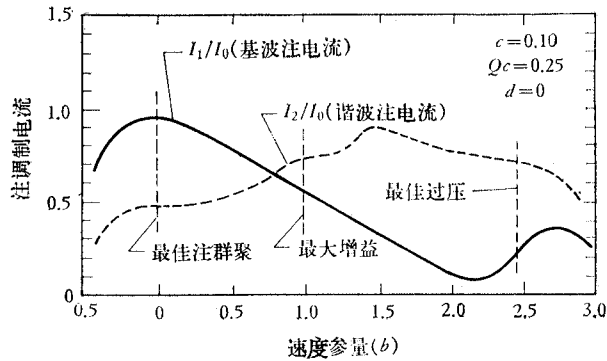


图3 饱和时,基波与谐波注调制电流(计算值)

3. 相速跳变量对效率的影响

从各次试验的结果来看,相速跳变量的大小对效率是有较大影响的。这一点在第4、5、6、7次试验中可以看地比较明显。在第4次试验中,由于跳变量较小,因而电子作用效率提高得就少些。在第7次试验中,由于第二阶跳变量过大,结果使效率提高甚少,只有17%左右。在第5和第6次试验中,跳变量选择得稍好些,因而效率也高些。

第3次试验失败的原因是由于一阶跳变量太大造成的。

综合这些结果,我们可以看到,在文献[2]和[4]中关于跳变量对效率的影响的论述是与实验结果相一致的,而O. Sauseng^[3]认为速度变化的幅度并不重要的结论是与实验结果不一致的。我们认为,J. E. Rowe^[2]提出的关于“一阶跳变的幅度不宜过大;而在二阶跳变中,以第一阶慢变化,第二阶快变化为佳”的原则是正确的,可作为实验中的参考准则。但是,J. E. Rowe在文献[2]中给出的图3是有问题的。这是因为相速跳变50%(或70%)将意味着螺距要跳变50%(或70%)左右,这是不合理的。这一点在我们对比文献[4]中的实验结果 $[(1 - p_2/p_1) = 20\%]$ 时也可以看到。另外,从我们试验的结果中也可看到,当相速以电压表示时,跳变量落在50%是合适的。

4. 跳变段长度问题

在一阶跳变中,我们曾在相同跳变量下专门做了不同跳变段长度的试验(看表1),结果并未观察到效率发生明显的变化。因此,我们在做二阶跳变试验时参考了文献[4]中的实验结果,把一阶跳变中的 $l_2 = 4\lambda g$ 这个条件改为 $l_2 \approx 2\lambda g$; $l_3 \approx 2\lambda g$,并在此基础上专门做了跳变量对效率影响的试验。从试验结果我们可以看到,跳变段的长度对效率是有影响的,但并不像在文献[3]和[4]中指出的那样,认为它的选取的条件是临界的,而且是一个十分精密的设计参量。

对于这个问题,J. E. Rowe在文献[2]中并没有详细加以讨论。但从文献[2]中的图3我们可以看到,跳变段的总长度(一阶或二阶的)都取在1.5英寸左右。另外,J. E. Rowe在文章的最后部份提到了一个结论性的意见,他认为“渐变的最佳形式并不是绝对严格的,最佳渐变通常是在整个渐变区的前一半相速缓慢变化,而后一半相速迅速变化”。

我们认为,J. E. Rowe^[2]提出的上述原则是合理的。因为电子注在进入第一阶跳变

段时的初始条件是可以随激励功率而改变的, 因而跳变段的长度不同便可由激励条件来得到补偿。只要跳变段的长度落在一定的范围内, 例如 $N \approx 0.3-0.4^{[2]}$, 它对效率的影响就不会显得十分明显。所以, 实际制出的相速跳变管仍有 500MHz 带宽 ($\Delta f/f$ 约为 17% 左右) 的原因就在于此。

根据上面总结出的几条规律, 再综合 5、6、7 次试验的经验, 我们重新拟定出一个方案, 其实验结果如表 3 所示。

表 3

管号 \ 参量	f (GHz)	V_H (V)	V_1 (V)	η_e (%)	V_2/V_1 (%)	V_3/V_1 (%)	$r_1 a'$
8-38	2.8	2950	2907	29.7	82	60.2	0.825
管号 \ 参量	$r_2 a'$	$r_3 a'$	λ_{g1} (mm)	λ_{g2} (mm)	λ_{g3} (mm)	N_2	N_3
8-38	0.911	1.032	11.4	10.35	8.8	1.93	2.25

螺线尺寸如下:

$$\begin{aligned}
 p_1 &= 0.93 \text{ mm}, & p_2 &= 0.85 \text{ mm}, & p_3 &= 0.74 \text{ mm}, \\
 2a' &= 3 \text{ mm}, & \delta &= 0.3 \text{ mm}, \\
 l_1 &= 200 \text{ mm}, & l_2 &= 20 \text{ mm}, & l_3 &= 20 \text{ mm}.
 \end{aligned}$$

这次试验的结果是比较满意的。工作频带符合了要求, 频带也较宽, 效率也较高。最高的电子效率为 29.8%, 经单级降压后总效率(包括热子功率在内)可达到 41.8%。管子的实际工作电压 V_H 也符合了预言值 ($b_1 \approx 0$)。因此, 提高效率的试验工作到此暂告一段落, 并在此基础上研制了一批可供环模试验的合格管。

下面给出这种高效率管的其它高频特性的测试结果:

(1) 三级交调

$$(S/N)_{\text{饱和}} \geq 11\text{dB}, \quad (S/N)_{\text{比饱和和低3dB}} \geq 15\text{dB}$$

(2) 在 100MHz 内增益波动

$$\Delta G_{\text{饱和}} \approx 1\text{dB}, \quad \Delta G_{\text{比饱和和低3dB}} > 1\text{dB} (< 2\text{dB})$$

(3) 在小讯号时的非线性失真

$$\gamma \leq 2\%$$

(4) 调频使用时的寄生调幅

$$A_{r\text{饱和}} \leq 5\%$$

(5) 调幅调相转换系数

$$K_{p\text{饱和}} \approx 2 \sim 3^\circ/\text{dB}$$

(6) 噪声系数

$$N_F = 28\text{dB}$$

三、螺旋线型相速阶梯跳变管的设计方法

从我们所做的提高效率的试验结果可以引伸出一套设计计算方法来,这个方法至少对于增益参量 C 不大于 0.1 的情况是适用的。我们曾用这个方法设计计算过三种行波管(功率均小于 30W, 增益参量 C 均小于等于 0.1), 计算结果与实测值都符合得较好。下面我们先讨论一下设计方法, 然后再叙述这个设计方法的实验验证结果。

(一) 设计方法

1. 选择参量的原则

(1) 电子作用效率的选择

均匀螺旋线管的电子效率 η_e 一般约为 15% 左右; 采用相速负渐变的行波管的电子效率 η_e 则可高达 45% 左右。从文献报道来看, 一般电子效率 η_e 在 35% 左右, 其中按“硬核群”模型理论做的效率试验管的最高电子效率可达到 47% (这个效率是计入了耦合头的 1dB 损耗的效率, 管子的实际效率要比 47% 约低 1dB, 即在 37% 左右)。

根据我们试验结果来看, 采用阶梯式相速负渐变的管子的效率可比均匀螺旋线管的效率高一倍左右。从设计管子选择效率 η_e 的角度出发, 我们认为, η_e 一般以选择在 20—30% 之间为宜。效率选得太低, 将来会遇到输出功率容量太富裕的问题; 反之, η_e 选得太高, 将来会遇到输出功率不够用的困难。

(2) $\gamma a'$ 的选择

由于相速跳变是采用减小跳变段的螺距来获得速度再同步的, 这就必然会导致跳变段的 $\gamma a'$ 值增大而耦合阻抗下降的问题。跳变段的耦合阻抗下降会使跳变段对提高效率的作用受到限制, 因而频带会发生偏移。为了避免发生频偏问题, $\gamma a'$ 值必须选择适当。根据我们的实践经验, 作用段的 $\gamma_1 a'$ 值以取在 0.7—0.9 范围内为宜。这时跳变段的 $\gamma a'$ 值与一般均匀螺旋线管的数值相近, 可以有足够大的耦合阻抗, 这样跳变段对提高效率的作用才能得到充分的发挥。

从我们的经验来看, $\gamma_1 a'$ 小些, 效率就容易做得高些; 反之, 效率就不容易做得高。在我们的试验管中, $\gamma_1 a'$ 与 η_e 的关系如表 4 所示。

表 4

参 量 \ 管 型	S-1	S-2	C-1	C-2	C-3
$f(\text{GHz})$	2.8	2.9	4.1	4.5	4.1
$\gamma_1 a'$	0.825	0.798	0.912	0.777	0.872
$\gamma_2 a'$	0.913	0.885	1.029	0.89	0.935
$\gamma_3 a'$	1.05	1.04	1.245	1.073	1.105
$V_2/V_1(\%)$	82	81.4	78.5	79	86.7
$V_3/V_1(\%)$	60.4	59	53.7	54.2	62.4
$\eta_{e\max}(\%)$	29.7	29.8	19.5	23.7	21.8

以上测得的 η_{\max} 值中只有 S-2 管是无电缆损耗的管子效率值, 其它管子的 η_{\max} 值都是带有 0.5dB 左右的电缆损耗时测得的管子实际效率值。在以上所选择的 $\gamma a'$ 范围内, 管子在 500MHz 带宽内输出功率的变化约在 0.5dB 左右。

(3) 跳变段的长度选择

我们曾在试验结果的讨论中较详细地分析过这个问题。基于这些分析, 从设计管子的角度出发, 我们认为, 在一阶跳变中可选用 $l_2 \approx 4\lambda_{g2}$ 而在二阶跳变中则可选用 $l_2 \approx 2\lambda_{g2}$, $l_3 \approx 2\lambda_{g3}$ 的条件进行试制。但应指出, 跳变段的 CN 值以落在 0.3—0.4 的范围为好。

(4) 跳变段内相速跳变幅度的选择

前面已经提到过, 相速跳变幅度对效率是有较大影响的。根据我们的试验结果来看, V_2/V_1 及 V_3/V_1 应在如下范围内较为合适:

$$V_2/V_1 = 75-80\% \quad V_3/V_1 = 50-60\%$$

V_1 ——均匀段螺线以电压表示的相速。

V_2 ——第一阶跳变段螺线以电压表示的相速。

V_3 ——第二阶跳变段螺线以电压表示的相速。

一般来说, 在选择跳变量时必须避免跳变太剧烈。在二阶跳变中, 第一阶应是慢变化的, 第二阶应是快变化的, 这将产生较好的效果。

(5) 作用段的速度参量 b_1 的选择

前面已经提到 O. Sauseng 对如何选择速度参量 b 的主要论点, 这个论点曾被我们的多次实验所证实, 即只有在 $b_1 \approx 0$ 的条件下, 才能得到最大的功率输出和最高的效率。因此, 我们在设计相速跳变管时应把作用段的速度参量选择为:

$$b_1 = 0$$

(6) 作用段的长度问题

作用段的长度应根据用户对管子增益的要求来计算确定。在此提出一个值得引起注意的问题, 当作用段的长度太短时, 效率提高是会受到限制的。我们在试制 C-1 管时曾出现过这个问题。根据我们的经验, 作用段的长度至少应设计在使增益大于 26dB。更严格的要求是使作用段的终端具有较高的群聚电流, 但这只能通过大信号计算来得到。

2. 设计计算程序

设计计算可分成两大部份, 即螺线几何尺寸的计算和管子长度及增益的计算。

(1) 螺线几何尺寸的计算

(a) 均匀段螺线尺寸的计算

相速负渐变管的均匀段螺线的几何尺寸的计算方法是与一般均匀螺线管的计算方法不同的。前者在计算中要引入 $b_1 = 0$, 即 $V_H = V_1$ 的条件, 而后者则要引入小讯号同步条件 ($b_1 \neq 0$)。下面具体地介绍计算方法:

(i) 根据 $b_1 = 0$ 的条件可求得 γ_1 值:

$$\because b_1 = 0$$

$$\therefore u_{01} = v_{\varphi 1} = 5.93 \times 10^5 \sqrt{V_H}$$

由 $v_{\varphi 1}$ 可得

$$\lambda_{g1} = v_{\varphi 1} / f_0 \quad \therefore \gamma_1 = 2\pi / \lambda_{g1}$$

(ii) 根据前述的原则选择 $\gamma_1 a'$ 便可求得

$$2a' = 2\gamma_1 a' (1/\gamma_1) = \gamma_1 a' (\lambda_{g1}/\pi)$$

(iii) 由中心频率 f_0 可求得 $k a'$

$$\lambda_0 = c/f_0$$

$$k a' = 2\pi a' / \lambda_0$$

(iv) 选择 R/a' 及夹持杆材料作出以 $\gamma a'$ 为变量的 $k a' \text{ctg } \varphi - \gamma a'$ 的色散曲线^[5]

(v) 由 $\gamma_1 a'$ 值查色散曲线求得

$$k a' \text{ctg } \varphi_1$$

(vi) 求作用段的螺距 p_1 :

$$\therefore \text{ctg } \varphi_1 = \frac{k a' \text{ctg } \varphi_1}{k a'} = \frac{2\pi a'}{p_1}$$

$$\therefore p_1 = \frac{2\pi a'}{\text{ctg } \varphi_1}$$

(b) 第一阶跳变段螺距 p_2 的计算

(i) 根据前述的原则选定 (V_2/V_1) 值便可求得

$$V_2 = V_1 \cdot (V_2/V_1)$$

$$\therefore v_{\varphi_2} = 5.93 \times 10^5 \sqrt{V_2}$$

$$\lambda_{g2} = v_{\varphi_2} / f_0$$

$$\therefore \gamma_2 a' = 2\pi a' / \lambda_{g2}$$

(ii) 由 $\gamma_2 a'$ 值查色散曲线可求得

$$k a' \text{ctg } \varphi_2$$

(iii) 求螺距 p_2 :

$$\text{ctg } \varphi_2 = k a' \text{ctg } \varphi_2 / k a'$$

$$p_2 = \frac{2\pi a'}{\text{ctg } \varphi_2}$$

(c) 第二阶跳变段螺距 p_3 的计算

方法步骤同 2), 不再重复.

(d) 螺线的丝径可在 $\delta/p = 0.3-0.45$ 的范围内选择, 一般以 $\delta/p = 1/3$ 为好.

(2) 管子长度及增益的计算

这个问题的计算方法与一般的小讯号计算方法相同, 不再重复. 在此提出一个问题, 那就是由于均匀段螺线在 $b_1 \approx 0$ 的条件下工作, 因而均匀段的增益计算值就会偏小; 而跳变段的增益由于长度较短或速度参量 b 值太大而显得很小(只有 5—6dB); 因此总的增益计算值要比实际管子的增益实测值低约 5—10dB. 但是, 在这个问题上有一个实际经验可供参考, 那就是渐变管的实际增益值与非渐变管的实际增益值相差不多, 大致相同.

(二) 相速阶梯跳变管的设计方法的实验验证

我们曾用上述计算方法设计过另外四支相速阶梯跳变管. 从测试的结果, 我们可以看到, 计算值能很好地与实测值相符合(同步电压的计算值与实测值的误差只有 2%), 管子的效率有了明显的提高, 效率改善因子为 1.5 到 2.3, 管子的工作频带及中心频率亦符合

了我们的要求。在表 5 中列出了计算值与实测值,作为比较。

表 5

管 型	参 量	实 测 值	计 算 值	$\eta_{\max}(\%)$
		$V_H(\text{V})$	$V_1(\text{V})$	
S-2		2950	3000	29.8
C-1		2900	2940	25.6
C-2		2050	2040	19.5
C-3		2630	2620	23.7
C-4		1950	1930	21.8
C-5		3000	2940	23

参加上述工作的有: 李子荣、宇新、张秀芬、吴静贤、赵仲宏、忻元根、李宝林、王林秋等同志。何友成、滑泉水、李淑兰三同志在跳变螺线的绕制工艺方面做了大量的工作。黄国祥、任裕安、周文表等同志在本文的整理过程中给予了热心的指教和帮助,并提供了宝贵的意见,在此一并向他们表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- [1] J. G. Meeker and J. E. Rowe, *IEE Trans. on Electron Devices*, ED-9 (1962), 257.
- [2] J. E. Rowe, and C. A. Brackett, *IEEE Trans. on Electron Devices*, ED-12 (1965), 441.
- [3] Otto Sauseng, *7th International Conference on Microwave and Optical Generation and Amplification*, p. 16—29, 1968.
- [4] 大原省尔, 研究实报 16, 1967.8.
- [5] 周文表, 电子学通讯, 1975 年第 1 期第 1 页.
- [6] Karl B. Nielas and Ralph W. Gerchberg, *IEEE Trans on Electron Devices*, ED-15 (1968), 49.