

体效应振荡器的工作特性和波导管的工作状态

邵智轩

学号：1400012141^{*}

(日期：2019 年 4 月 5 日)

本实验目的为：了解体效应振荡器的结构、工作原理和工作特性及波导管的三种工作状态；掌握微波的三种基本参量的测量方法、测量波导波长 $\lambda_g = 48.90 \text{ mm}$ 、确定波导管中波传播的相速度 $v_g = 4.401 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，光速 $c = 3.005 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，群速度 $u = 2.053 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

关键词：体效应振荡器，特性曲线，波导管，功率，频率，驻波比，微波元件

^{*} shaozhixuansh@pku.edu.cn; (86)13381350619

I. 引言

微波是波长很短、频率很高的电磁波。由于它有一系列特殊的性质，因而在国防、通讯、工农业生产、科学研究以及日常生活中得到广泛的应用。了解微波的产生和传输特性，掌握有关微波的一些基本参量，如功率、频率、电压驻波比的测量原理和测量方法，对熟悉和掌握微波技术是必不可少的。

II. 实验原理

A. 体效应振荡器的结构和工作特性

将体效应二极管适当放置在高 Q 谐振腔中，构成谐振电路，以便产生微波振荡。对于不同类型的体效应管应配以相应的谐振腔，使之达到较好的匹配，工作在渡越时间模式或者畴模式。本实验中的固态源采用机械调谐方式，频率由数字表直接显示。

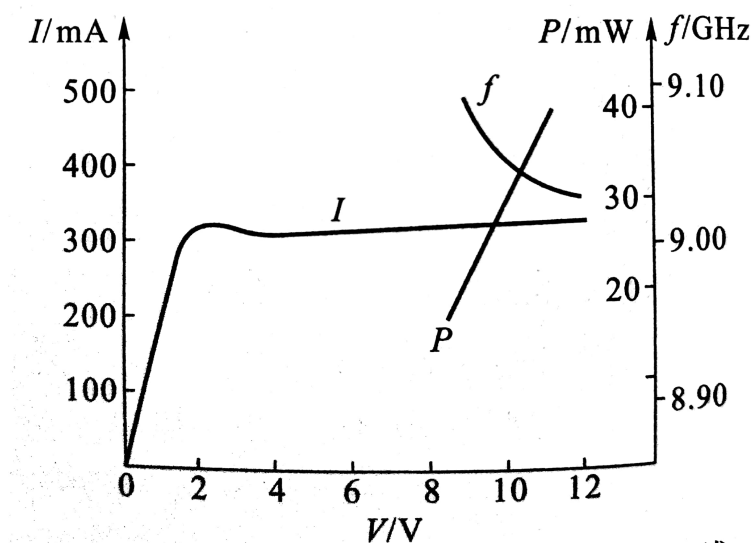


图 1: 体效应振荡器的典型特性曲线

体效应振荡器的一组典型特性曲线如图1所示。使腔体的尺寸一定，改变体效应管的工作电压，其工作电流、微波输出功率和频率都将发生变化。在阈值电压以下，体效应管的电流随电压几乎线性增长，而当电压超过阈值时，由于偶极畴的产生和快速成长，电流下降，继续增加电压，电流变化平缓。这在畴形成向阳极渡越直至消失的过程中都是如此。此外，随工作电压的增加，输出功率增加，而振荡频率降低。当然，并非所有体效应振荡器的功率和频率与工作电压间的关系都类似图1的形式。不同的体效应管由于半导体材料中掺杂、缺陷或位错等微观情况不完全一致，因而振荡器的工作特性一般来说是不相同的。

B. 波导管的工作特性

1. 波导管中波的传播特性

一般来说，波导管中存在入射波和反射波。描述波导管中匹配和反射程度的物理量是驻波比或反射系数。由于终端情况不同，波导管中电磁场的分布情况也不同，可以把波导管的工作状态归结为三种状态：

- 匹配状态：不存在反射波， $|E| = |E_i|$ ；
- 驻波状态：终端发生全反射， $|E_i| = |E_r|$ ，所以在驻波波腹处 $|E|_{\max} = |E_i| + |E_r|$ ，驻波波节处 $|E|_{\min} = |E_i| - |E_r| = 0$ ；
- 混波状态，终端是部分反射， $|E_r| < |E_i|$ ，所以 $|E|_{\max} = |E_i| + |E_r|$ ， $|E|_{\min} = |E_i| - |E_r| \neq 0$ 。

波导管中的波导波长 λ_g 大于自由空间波长 λ ，由于

$$c = \lambda f \quad (1)$$

$$v_g = \lambda_g f \quad (2)$$

式中 c 为光速， v_g 为相速度。波导管中波传播的相速度 v_g 大于光速 c 。相速度只是相位变化的速度，并非波导管中波能量的传播速度（群速度 u ），因此相速度可以大于光速。相速度 v_g 、群速度 u 、光速 c 的关系式为：

$$v_g u = c^2 \quad (3)$$

实验中，我们通过测量波导波长 λ_g 和频率 f 来决定光速 c 、相速度 v_g 和群速度 u 。

2. 驻波测量

检波晶体管的检波电流 I 与探针所在处的电场大小 E 满足关系式：

$$I = k_1 E^n \quad (4)$$

在小功率情况下，可以相当精确地认为满足平方律检波， $n \approx 2$ 。

小驻波比 ($1.005 \leq \rho \leq 1.5$) 的测量: 驻波波腹和波节都不尖锐, 因此要多测几个驻波波腹和波节, 按下式计算 ρ 的平均值:

$$\rho = \frac{E_{\max 1} + E_{\max 2} + \dots + E_{\max n}}{E_{\min 1} + E_{\min 2} + \dots + E_{\min n}} \quad (5)$$

当检波晶体满足平方律时,

$$\rho = \frac{\sqrt{I_{\max 1}} + \sqrt{I_{\max 2}} + \dots + \sqrt{I_{\max n}}}{\sqrt{I_{\min 1}} + \sqrt{I_{\min 2}} + \dots + \sqrt{I_{\min n}}} \quad (6)$$

中驻波比 ($1.5 \leq \rho \leq 10$) 的测量: 此时只需测一个驻波波腹和一个波节, 按下式计算:

$$\rho = \frac{E_{\max}}{E_{\min}} = \sqrt{\frac{I_{\max}}{I_{\min}}} \quad (7)$$

3. 晶体检波特性曲线和检波律的测定

令驻波测量线终端短路 (驻波状态), 此时沿线个点驻波振幅与终端距离 l 的关系为:

$$|E| = k_2 \left| \sin \frac{2\pi l}{\lambda_g} \right| \quad (8)$$

设以线上 $l = l_0$ 处的驻波波节为参考点, 将探针向某一边移动, 每一处驻波电场值便有一相应的检波电流值。如果测量时不必知道检波律 n , 我们由实验测得 $I(l)$, 由式 (8) 算出 $|E(l)|$, 直接画出 $I - |E|$ 关系曲线, 利用它可以实际测得的检波电流值找出相应的驻波电场相对值, 从而求出正确的驻波比。

如果需要直到检波律 n , 可以由实验测量在两个相邻波节之间的驻波曲线 $I(l)$, 再利用下列关系式定出 n :

$$n = \frac{-0.3010}{\lg \cos \frac{\pi \Delta l}{\lambda_g}} \quad (9)$$

其中 Δl 为驻波曲线上 $I = I_m/2$ 两点的距离, I_m 为波腹的检波电流。

III. 实验装置

本实验采用的实验线路如图2所示。

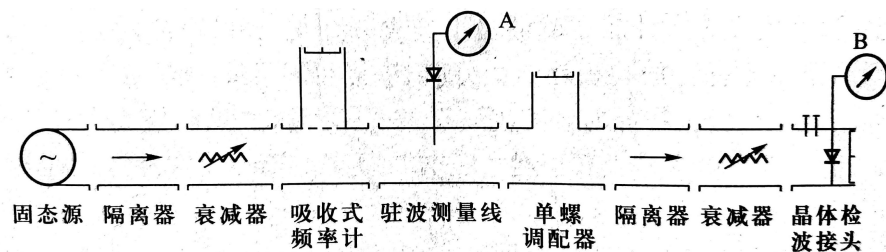


图 2: 实验线路

IV. 实验内容

A. 测量体效应振荡器的工作特性曲线

将信号源的工作方式置于“等幅”状态，保持频率读数为 9.000 GHz 不变，通过电压调节钮，在 0 - 13.0 V 范围内连续改变体效应管的工作电压，并得到相应的工作电流显示。同时，通过测量装置中的波长表和光点检流计 B，测出频率和相对功率。测量数据如表 I 所示，工作特性曲线如图 3 所示。

表 I: 体效应振荡管的工作电流 I 、相对输出功率 P 、频率 f 随工作电压 V 的变化关系^a

工作电压 V/V	13.00	12.50	12.00	11.50	11.00	10.50	10.00	9.50	9.00	8.50	8.00	7.50
工作电流 I/mA	352	308	306	306	306	306	306	306	307	308	309	311
相对输出功率 P	95.5	87.4	80.2	74.9	63.2	52.4	39.0	28.0	18.5	11.5	6.2	2.0
波长表读数 λ/cm	7.725	7.734	7.748	7.780	7.822	7.871	7.946	8.042	8.143	8.238	8.332	8.508
对应频率 f/GHz	8.995	8.994	8.992	8.989	8.985	8.980	8.973	8.963	8.953	8.943	8.934	8.917
工作电压 V/V	7.00	6.50	6.00	5.50	5.00	4.50	4.00	3.80	3.50	3.40	3.20	
工作电流 I/mA	312	312	314	325	325	325	325	329	360	359	355	
工作电压 V/V	3.00	2.70	2.50	2.30	2.10	1.80	1.50	1.20	0.90	0.60	0.30	
工作电流 I/mA	350	336	323	308	289	258	224	186	145	99	52	

^a 当工作电压较小时，无法测量相对输出功率 P 和频率 f ，只测量工作电流 I

与教材给出的典型特性曲线（图 1）相比，工作电流曲线的特点是基本吻合的，而频率 f 和工作电压 V 的关系与图 1 的变化趋势完全相反。在实测的曲线中，在阈值电压以上，频率反而随电压增大而增加。这正说明了，由于不同的体效应管由于半导体材料中掺杂、缺陷或位错等微观情况不完全一致，因而振荡器的工作特性一般来说是不相同的。

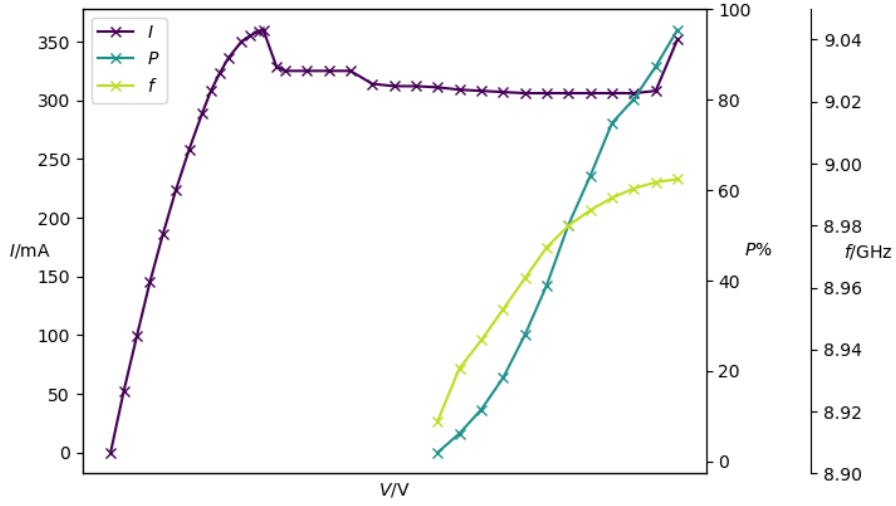


图 3: 实验测得的体效应振荡管的特性曲线

B. 观测波导管的工作状态

1. 测量小驻波比与中驻波比

在“等幅”状态下，频率显示为 9.000 GHz，体效应管的工作电压为 12.02 V。

利用单螺调配器改变测量线终端的状态，可调制最佳匹配状态 ($\rho < 1.10$)，此时实测的小驻波比为：

$$\rho = \frac{\sqrt{59.8} + \sqrt{59.5} + \sqrt{59.1} + \sqrt{58.0}}{\sqrt{51.5} + \sqrt{51.5} + \sqrt{51.4} + \sqrt{51.0}} = 1.07 \quad (10)$$

反射系数：

$$|\Gamma_0| = \frac{\rho - 1}{\rho + 1} = 0.034 \quad (11)$$

利用单螺调配器改变测量线终端的状态，可调制最佳混波状态 ($2 < \rho < 3$)，此时实测的中驻波比为：

$$\rho = \sqrt{\frac{93}{23}} = 2.01, \quad |\Gamma_0| = \frac{\rho - 1}{\rho + 1} = 0.336 \quad (12)$$

C. 测量波导波长

相邻两个波节间的距离即为波导波长 λ_g 的一半，实测结果为

$$\lambda_g = 48.90\text{mm} \quad (13)$$

则群速度 $v_g = \lambda_g f = 4.401 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。已知波导管宽边 $a = 22.86 \text{ mm}$ ，自由空间波长

$$\lambda = \frac{\lambda_g}{\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_g}{2a}\right)^2}} = 33.40 \text{ mm} \quad (14)$$

由此可计算光速 c 和群速度 u ：

$$c = \lambda f = 3.005 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (15)$$

$$u = \frac{c^2}{v_g} = 2.053 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (16)$$

1. 测量两个相邻波节之间的驻波曲线 $I(l)$ ，作出检波晶体管的 $I - |E|$ 曲线，确定晶体检波律 n

在不同位置 l 处记录检波电流 I 的大小，数据如表II所示， $I(l)$ 曲线如图4所示， $I - |E|$ 曲线如图5所示。

表 II: 两个相邻波节之间的检波电流 I 随位置 l 的变化关系

实际位置 x/mm	146.7	142.8	140.6	138.2	133.8	129.6	128.0	126.6	121.9
相对位置 l/mm	0	3.9	6.1	8.5	12.9	17.1	18.7	20.1	24.8
检波电流 I/mA	2.0	30.0	58.5	93.0	119.0	83.0	58.5	37.0	2.2

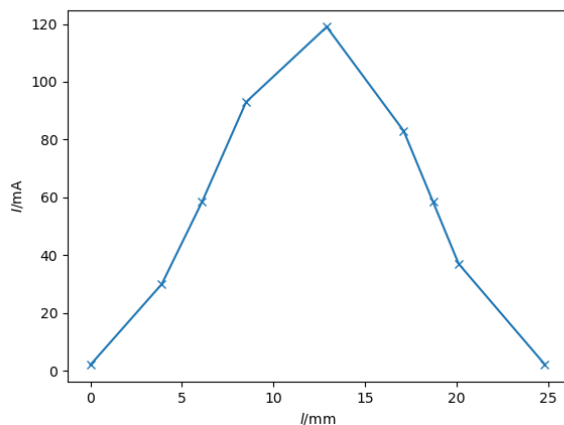


图 4: 实测 $I - l$ 曲线

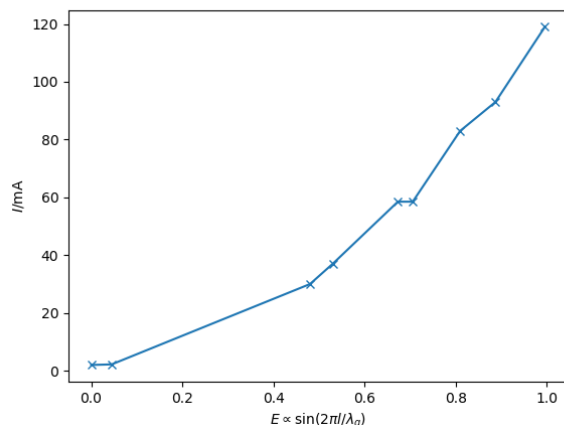


图 5: 实测 $I - |E|$ 曲线

将实测的半高宽 Δl 代入式 (9) 得

$$n = \frac{-0.3010}{\lg \cos \frac{\pi(18.7-6.1)}{48.9}} = 1.87 \quad (17)$$

V. 致谢

感谢王常生老师对实验的悉心指导，使我自己摸索出了微波元器件的使用方法及波导管的工作特性，最终克服困难，顺利完成实验。尤其是王老师主张让我们自己多琢磨琢磨，要敢于尝试，勤于思考，这种精神让我受益匪浅。

[1] 吴思诚, 荀坤. 近代物理实验 (第四版). 北京: 高等教育出版社, 2015