

# 体效应振荡器的工作特性和波导管的工作状态

滕一鸣\*

北京大学物理学院 学号: 2000011380

(实验日期: 2024 年 3 月 7 日)

本实验测量了体效应振荡器的工作电流、输出功率及频率与工作电压的关系, 意外测得了输出功率与工作电压间的非单调关系. 同时, 实验利用驻波测量线测量了系统在最佳匹配状态及混波状态下的驻波比和全反射状态下的波导波长. 此外, 实验测得了全反射状态下使用的微波频率为 8.954 GHz, 并据此计算出波导中电磁波的相速度为  $4.137 \times 10^8$  m/s 而群速度为  $2.910 \times 10^8$  m/s. 最后, 实验利用驻波测量线的探针测得了两个相邻波节间的驻波曲线, 并通过晶体检波管的  $I - |E|$  曲线确定了设备使用的平方律检波管的检波律  $n$  实际为 1.868.

**关键词:** 微波, 波导, 体效应振荡器

## I. 引言

微波指波长介于红外线和无线电波的电磁波, 其频率范围大约在 300 MHz 到 300 GHz 之间, 涵盖了 UHF、SHF、EHF 的范围. 微波与介质相互作用时, 通常会发生穿透、反射或吸收等现象, 并且这种相互作用往往取决于介质的性质. 例如, 对于玻璃、塑料和瓷器等材料, 微波几乎可以穿透而不被吸收; 然而, 对于水和食物等, 微波则会被吸收并导致介质升温; 至于金属, 则会导致微波在表面发生反射. 值得注意的是, 微波的波长较短, 因此在大尺度空间传播时不太容易发生衍射现象, 这意味着微波的测量会具有较强的方向性和高增益. 此外, 微波的波长与实验室中使用的微波设备的尺寸相近, 因此制造微波器件相对容易. 鉴于微波具备上述特性, 与微波相关的技术研究在各个领域都具有广泛而重要的意义.

微波技术是近代以来逐渐发展起来的一门尖端科学技术. 它不仅在国防、工业、农业和通信等领域有着广泛的应用, 也是科学研究的重要对象与工具. 微波通常由一些特殊的微波电子器件产生, 如反射式速调管、磁控管等. 然而, 自 20 世纪 60 年代始, 各种类型的半导体振荡器作为一类新型的微波源开始占据主流. 这些器件具有体积小、重量轻、结构简单、使用方便、工作电压较低等特点, 体效应振荡器即是其中的代表. 在本实验中, 我们研究了体效应振荡器的工作特性, 观察了波导管的三种工作状态, 并测量了系统在匹配状态和混波状态下的驻波比. 此外, 我们还对波导波长进行了测量, 从而确定了波导管中波的传播相速度、群速度和光速. 最后, 我们通过两波节间的驻波曲线确定了检波晶体管的  $I - |E|$  曲线, 进而实验测量了其检波指数.

## II. 理论原理

### A. 体效应振荡器

体效应振荡器的核心元件是耿氏体效应二极管, 其工作基础是 Gunn 效应. 具体而言, 我们在 n 型砷化镓单晶样品的两端制备欧姆接触电极并通电, 外加电场大于每厘米几千伏特的临界阈值时便会产生频率很高的电流振荡. 这一振荡频率与样品的长度成反比关系, 大约等于载流子在电极间渡越时间的倒数.

Gunn 效应源于所选用的半导体材料具有的特殊的平均电子漂移速度特性. 这些材料的特点是, 在较低场强时, 平均电子漂移速度随电场线性增加, 但当电场超过某一阈值时, 电子会被强场驱动

\* [tengyiming@stu.pku.edu.cn](mailto:tengyiming@stu.pku.edu.cn); (86)13287560665

而获得足够的能量以进入对应的有效质量较大的子能谷，这会是电子漂移速度减小，微分迁移率变为负值。如果我们在 n 型砷化镓样品上加偏置电场使得微分迁移率为负，那么样品内部的电场和电子分布将不再均匀。在样品的不同区域，由于电子迁移速度不同，空间电荷将会出现局部积累。类似电偶极层的结构在阴极附近生成并不断向阳极移动，直至到达阳极时消失。随后，新的电偶极层又会在阴极附近出现，这一过程循环往复，使得样品的输出电流呈现周期性变化。将处于这种状态下的二极管置于合适的谐振腔内，就可以产生微波振荡，从而可被作为微波源使用。

## B. 波导管

一般情况下，波导管内同时存在入射波和反射波。由于终端条件不同，波导管内的电磁场分布也不同。通常使用驻波比或反射系数来描述波导管中匹配和反射的程度。波导管的工作状态分为三种，即匹配状态、驻波状态和混波状态。在匹配状态下，波导管内不存在反射波；在驻波状态下，终端发生全反射；而在混波状态下，终端发生部分反射。在实验中，我们通过调节单螺调配器来改变波导的终端条件，使波导中的电磁场分别处于上述三种状态之一，并利用驻波测量线对波导内的电磁场纵向分布进行测量，从而计算得到波导内电磁波的相关参量。

## III. 实验设备

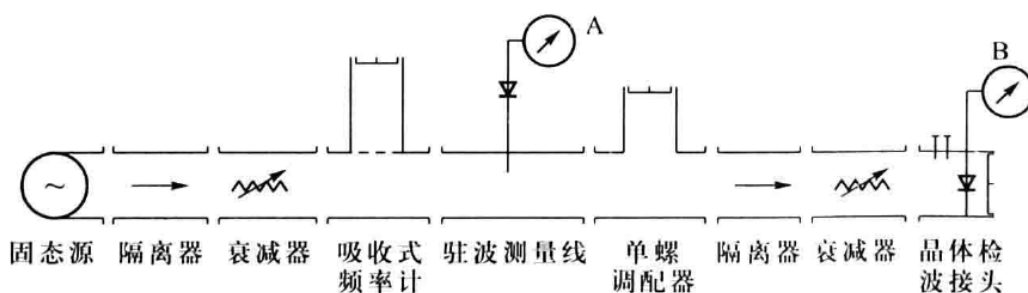


图 1: 实验微波系统示意图 [1].

实验所用微波系统如 图 1 所示。其中固态源是体效应振荡器制成的微波信号源；隔离器可以使微波源发出的微波单向传播，防止微波能量反射回信号源导致其损坏；衰减器用于调节微波信号的大小；吸收式频率计用于测量微波频率；驻波测量线用来测量纵向各位置处的电场强度；单螺调配器用来改变驻波测量线终端的边界条件，以使系统处于不同的工作状态；晶体检流计用于测量微波的相对功率。

## IV. 实验结果与分析

### A. 观测体效应振荡器的工作特性

将信号源工作模式置于等幅状态，调节输出频率为 9.000 GHz 并预热 30 分钟。随后我们将信号源置于教学状态并在 0 ~ 13.0 V 范围内改变工作电压，读取信号源显示的工作电流、使用频率计测量输出微波频率并通过检流计测量输出的相对功率。测量得到的信号源工作电流与工作电压的关系如 图 2 所示，而输出频率及输出功率与工作电压的关系见 图 3。

可以看到，实验测得的工作电流与输出频率特性曲线与 [1] 中的参考结果相似；但是我们测得的输出功率与工作电压关系与参考结果大相径庭：根据 [1]，输出功率应该随工作电压升高而增大；但

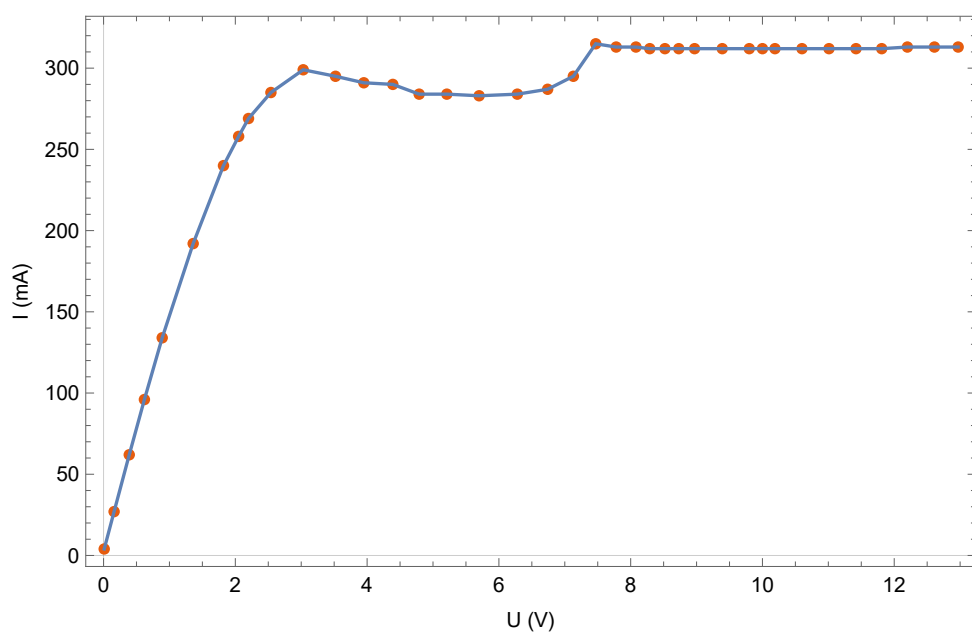


图 2: 信号源工作电流与工作电压的关系.

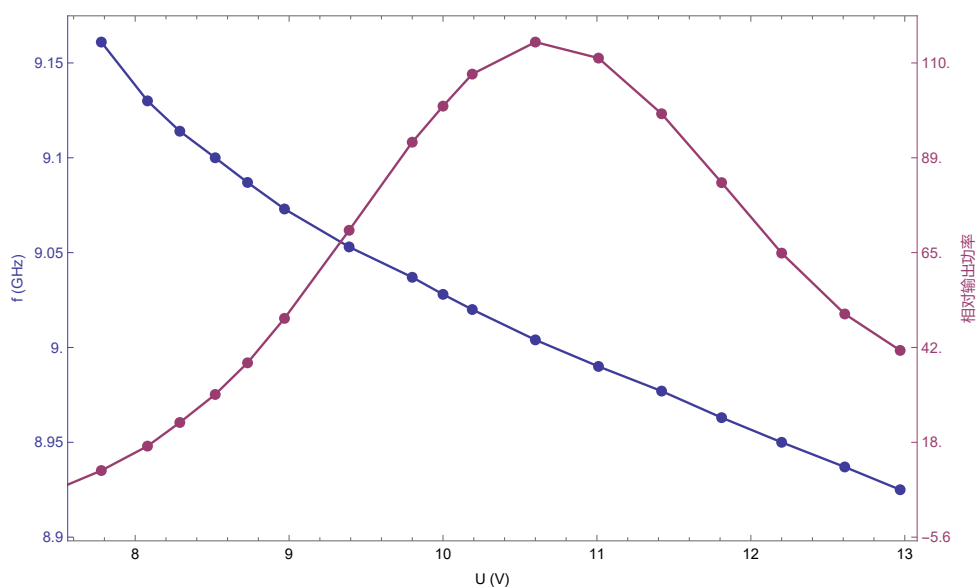


图 3: 信号源输出频率与输出功率和工作电压的关系.

是实测结果为输出功率在 10.8 V 左右取极值, 随后输出功率随电压升高而降低——这不但与参考结果不同, 而且和物理直觉相悖. 但是我们尚未能解释这一反常现象.

## B. 观测波导管的工作状态

### 1. 测量小驻波比

将信号源置于等幅状态, 调节频率旋钮, 使得频率读数为 9.000 GHz. 通过调节单螺调配器使系统接近最佳匹配状态, 此时使用驻波测量线测量得到的四组波腹波节处的示数见 表 I. 考虑到检波

表 I: 小驻波比状态下探针在四组波腹波节处的示数.

序号	1	2	3	4
波腹示数	46.0	46.0	46.0	46.2
波节示数	40.4	40.8	41.0	41.0

晶体管为平方检波，我们根据测量小驻波比的方案便有

$$\rho_1 = \frac{\sqrt{46.0} + \sqrt{46.0} + \sqrt{46.0} + \sqrt{46.2}}{\sqrt{40.4} + \sqrt{40.8} + \sqrt{41.0} + \sqrt{41.0}} = 1.06. \quad (1)$$

此时的反射系数便为

$$\Gamma_1 = \frac{\rho_1 - 1}{\rho_1 + 1} = 0.0291. \quad (2)$$

### 2. 测量中驻波比

通过调节单螺匹配器使得系统处于混波状态，此时使用驻波测量线测量得到的两组波腹波节处的示数见 表 II. 此时根据测量中驻波比的方案便有

$$\rho_2 = \frac{\sqrt{\frac{94.1}{13.0}} + \sqrt{\frac{95.0}{13.0}}}{2} = 2.70. \quad (3)$$

反射系数为

$$\Gamma_2 = \frac{\rho_2 - 1}{\rho_2 + 1} = 0.459. \quad (4)$$

表 II: 中驻波比状态下探针在两组波腹波节处的示数.

序号	1	2
波腹示数	94.1	95.0
波节示数	13.0	13.0

### 3. 测量波导波长

表 III: 使用平均值法测量波节位置数据表.

序号 $i$	1	2	3	4
$x_i^-$ (mm)	74.7	99.3	123.8	148.5
$x_i^+$ (mm)	87.7	103.3	128.8	152.4
$x_i = \frac{x_i^+ + x_i^-}{2}$ (mm)	81.05	101.3	126.3	150.45

调节单螺调配器使得测量线终端接近全反射. 我们采用平均值法来确定波节的位置: 我们测量波节两侧在指示器上输出均为 10.0 的位置 ( $x_i^+$  与  $x_i^-$ ), 并通过取这两个位置的平均值来确定波节的位置  $x_i$ . 我们据此测得半波导波长  $\lambda_g/2$  的平均值为

$$\frac{\bar{\lambda}_g}{2} = \frac{\frac{150.45-101.3}{2} + \frac{126.3-81.05}{2}}{2} = 23.60 \text{ mm}. \quad (5)$$

因而波导波长为

$$\bar{\lambda}_g = 46.20 \text{ mm}. \quad (6)$$

使用频率计测量得到的信号源输出频率为

$$f = 8.954 \text{ GHz}, \quad (7)$$

因而此时波导相速度为

$$v_g = f \bar{\lambda}_g = 4.137 \times 10^8 \text{ m/s}. \quad (8)$$

鉴于波导管截面长度为  $a = 22.86 \text{ mm}$ ，我们便可计算出所传播微波的自由空间波长为

$$\lambda = \frac{\bar{\lambda}_g}{\sqrt{1 + \left(\frac{\bar{\lambda}_g}{2a}\right)^2}} = 32.50 \text{ mm}, \quad (9)$$

进而群速度为

$$u = \lambda f = 2.910 \times 10^8 \text{ m/s}. \quad (10)$$

#### 4. 测量驻波曲线并确定晶体检波律

我们测量到的两相邻波节间的驻波曲线见 图 4. 我们测量得到驻波曲线上示数为波腹示数一半的两点间距离为

$$\Delta \ell = 11.9 \text{ mm}, \quad (11)$$

因而根据 [1]，实验使用的晶体的检波律实际值便为

$$n = \frac{-0.3010}{\log_{10} \cos \frac{\pi \Delta \ell}{\lambda_g}} = 1.868. \quad (12)$$

检波晶体管的  $I - |E|$  曲线便为 图 5.

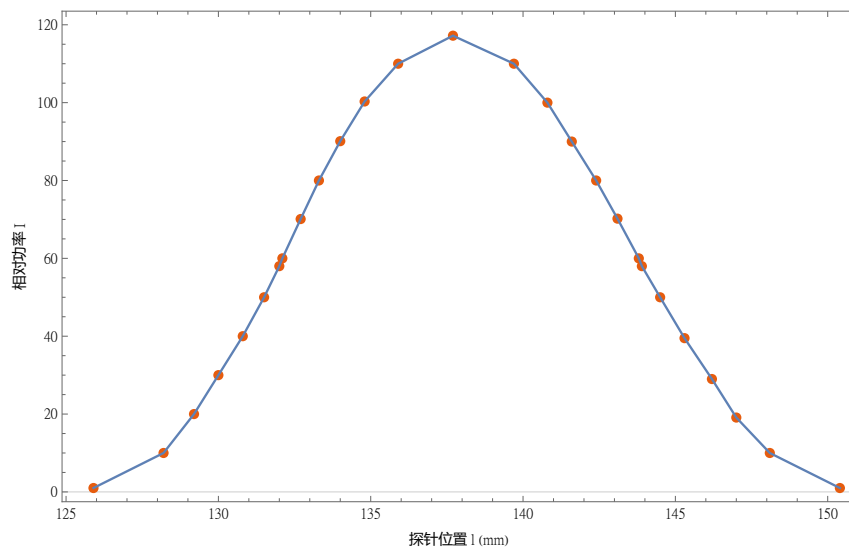


图 4: 相邻波节间的驻波曲线.

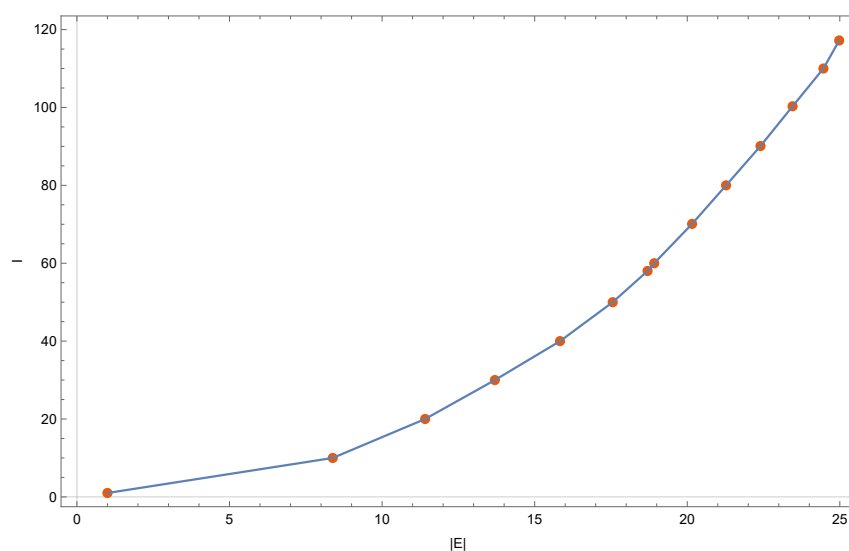


图 5: 检波晶体管的  $I - |E|$  曲线.

## V. 结论

本实验通过测量体效应振荡器的工作电压和工作电流、输出功率以及频率的特性曲线,研究了这种振荡器的工作特性,验证了体效应振荡器的工作原理,同时测量了波导管不同工作状态下内部的电磁场分布和对应的驻波比及反射系数.我们同时测量了波导管内电磁波的波导波长、相速度与群速度,验证了相速度的确大于真空光速.最后,我们测量了相邻波节间的驻波曲线并借此确定了检波晶体管的检波律,发现标称为平方检波的晶体管的检波指数实际为 1.868.

---

[1] 吴思诚, 荀坤. 近代物理实验. 高等教育出版社, 4 edition, 2015.

#### 附录 A: 思考题

a. 在  $a = 23.0 \text{ mm}$ ,  $b = 10.0 \text{ mm}$  的矩形波导管中能不能传播  $\lambda = 2 \text{ cm}$ ,  $3 \text{ cm}$  和  $5 \text{ cm}$  的微波? 各能传播哪些波形? 根据公式

$$\lambda_c = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}},$$

我们可以知道, 当  $m = 1$ ,  $n = 0$  时, 在该波导管中有可能传播的波长最大值为  $4.6 \text{ cm}$ , 因此波长为  $5 \text{ cm}$  的微波不能在这一波导管中传播. 类似的, 通过对  $m$  和  $n$  取不同值, 我们可以发现波长为  $2 \text{ cm}$  的微波的波形可能为  $\text{TE}_{10}$  波或  $\text{TE}_{20}$  波, 而对于波长为  $3 \text{ cm}$  的微波, 则只能为  $\text{TE}_{10}$  波.