

体效应振荡器的工作特性和波导管的工作状态

罗俊熙*

北京大学物理学院 学号: 2000012508

(实验日期: 2023/02/13, v2.1.4)

此部分为摘要. 200–300 字, 说明用什么方法做了什么事, 由此得到什么结果和结论, 有何意义. 摘要中不用缩略词, 不用第一人称. 本文档为对 `PKUMpLTX` 的使用示例, 灰色部分为额外针对 `LATEX` 模板使用的说明或是一些能提升输出效果的琐碎细节. 也请注意查看源文档 `template.tex` 中的注释.

关键词: 关键词 1, 关键词 2, 共 2–4 个

I. 引言

微波是一种波长很短, 频率很高的电磁波, 其性质让其很好地应用在国防、通讯和农业生产上, 为了了解微波的产生和传输特性, 掌握有关微波的基本参量, 如功率、频率、电压和驻波比等的测量原理和方法是必不可少的。微波通常由一些特殊的电子管如速调管和磁控管等产生, 而实验中常使用体效应振荡器和雪崩振荡器等来产生微波。这次实验就使用了体效应振荡器产生的微波源。微波能在波导管中传播, 分为三种状态: 匹配状态、驻波状态和混波状态, 而其在波导中传播的相速度大于光速, 可以通过测量频率和波导波长的方法来确定相速度、群速和光速。本次实验主要是了解体效应振荡器的一些性质, 并掌握微波三种基本参量的测量方法, 确定波导波长和波导管中的传播速度。

II. 理论

A. 体效应振荡器

体效应振荡器主要通过 Gunn 效应, 在 n 型的砷化镓单晶上产生很高的电流振荡, 然后辐射出微波。这个效应的成因是因为这种材料具有负的微分迁移率的区域, 令内部产生“高场畴”, 当高场畴传播到导体边界时, 就会产生电流脉冲, 进而转化为微波。这种脉冲是周期性的, 其频率为:

$$f = \frac{1}{T_D} = \frac{v_d}{L}$$

式中, T_D 是畴的渡越时间, 而 L 为样品的长度, v_d 为畴的运动速度。

* see.looooo@stu.pku.edu.cn; (86)13611162432

B. 体效应振荡器的工作特性

将体效应二极管放在高 Q 的谐振腔中，构成电路，就能产微波振汤，而本次实验使用的固态源则是使用机械调谐的方式，产生特定频率的微波。机器内部具有一个非接触活塞，可以改变谐振腔的有效长度，改变振荡频率，活塞移入腔内越多，电容减少，工作频率提升。因为每个体效应二极管的掺杂、缺陷或位错等都不一样，因此其工作电压、频率等关系都不一样。

C. 波导管中波的传播特性

波导管中能通过特定波长的电磁波，由于麦克斯韦方程式的限制，电磁场在其内部只能以特定的模式传播，这次实验的方形波导管，就只能通过 TE_1 的模式，其特色是在导管中形成垂直波导壁的电场，而且传播的波导波长和自由空间并不一样。满足：

$$c = \lambda f, \quad v_g = \lambda_g f$$

其中 c 为光速， v_g 为相速度。而理论表明，光在其内的相速度是大于光速的。因此我们可以通过测定波导波长 λ_g 和频率 f 来找出光速 c 。

D. 驻波测量

我们可以通过驻波测量线来进行驻波比和波导波长的测量，将系统调节至匹配的状态，而驻波比则是如下定义的

$$\rho = \frac{|E_{\max}|}{|E_{\min}|}$$

其中 E 为驻波线测得的场强。调节的方法则是通过单螺调配器和驻波测量线的交互调节，来形成不同的驻波比，驻波比反射率有着以下关系：

$$\Gamma_0 = \frac{\rho - 1}{\rho + 1}$$

这次实验的后半部分，需要在驻波的状态下进行。

E. 检波特性曲线和检波律

在测量驻波比时，检波晶体会输出信号测出，晶体的检波电流 I 和传输线探针周围的电场 E 满足：

$$I = k_1 E^n$$

其中 k_1 和 n 都是一些常数，一般地 n 都很接近 2，称为平方律检波。进行测量时，会先将测量线终端短路，驻波振幅与终端距离满足的关系为：

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

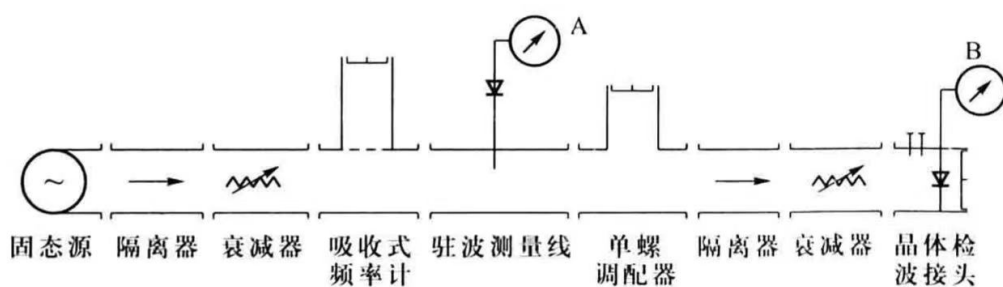


图 1. 实验线路图 [1]

我们可以通过检波电流关于 l 的曲线 $I(l)$ 和 E 来求得常数 n 进而得到晶体的检波律，一般地，我们可以用下列关系式定出 n ：

$$n = \frac{-0.3010}{\log_{10} \cos\left(\frac{\pi \Delta l}{\lambda_g}\right)}$$

其中 Δl 为驻波曲线上 $I = I_m/2$ 两点距离。

III. 实验装置

本次实验使用的微波信号由 DH1121A 型 3 cm 固态信号源提供，而主要元件有隔离器、衰减器、吸引式频率计、驻波测量线和单螺调配器。如图 1 搭建线路，其中 A 和 B 都是电流表，用以示波作用。

IV. 实验内容

1. 测量体效应振荡器的工作电压与工作电流、输出功率及频率的特性曲线；
2. 测量振荡频率和输出功率的关系曲线；
3. 调节和测量小驻波比和中驻波比的线路，并计算其反射率 Γ_0 ；
4. 测量波导波长、光速、相速度和群速度；
5. 测量驻波曲线和计算出检波律常数 n 。

V. 实验过程、结果及讨论

A. 观测体效应振荡器的工作特性

将信号源置于[等幅]状态，调节[频率]，使其至 9.000 GHz，预热 30 min。

按下[教学]，通过[电压]按钮，在 0 ~ 13.0 V 连续改变工作电压，得到频率计和光点检流计 B，测得微波频率和相对功率（注要调节短路活塞和单螺调配器），使检波接头输出最大。实验结果图 2，可以看出，在低压时体效应管的工作电流和工作电压成正比，

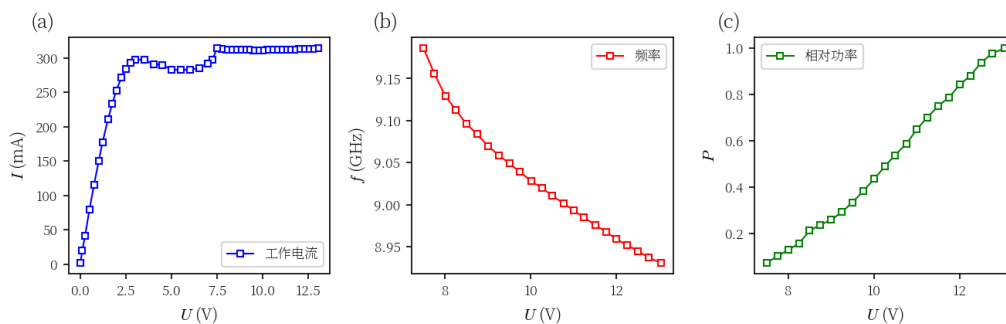


图 2. 体效应振荡器工作电压和微波输出关系图。(a): 工作电压与工作电流关系;(b): 工作电压与输出频率关系;(c): 工作电压与相对功率关系

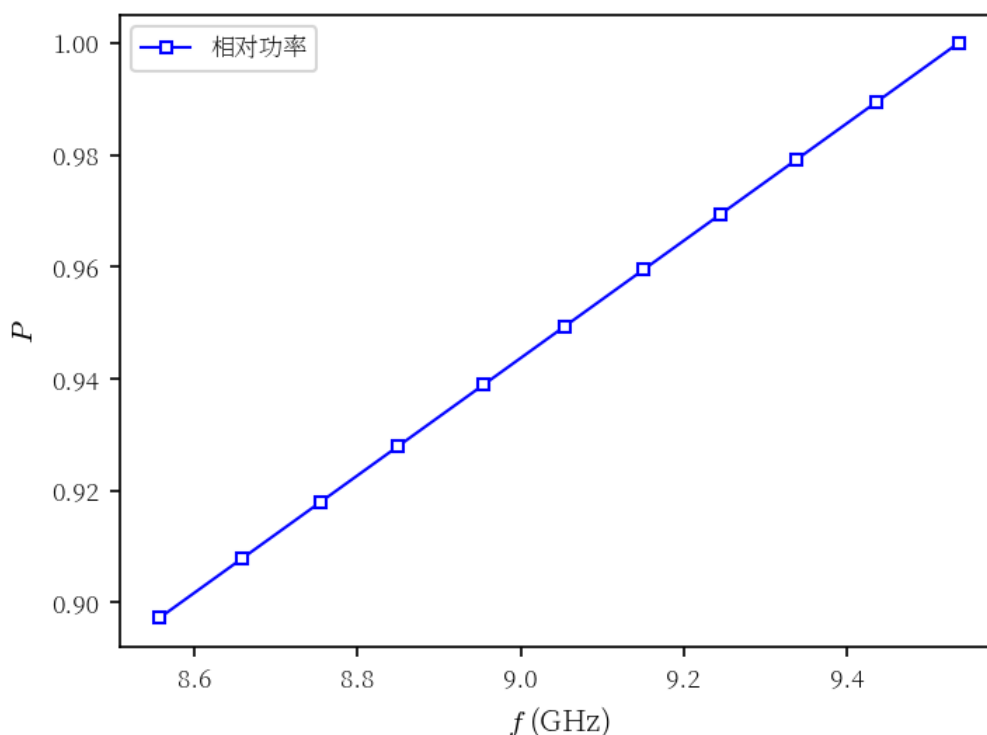


图 3. 输出频率和输出相对功率关系图。

随着电压增大，工作电流会出现一个高峰，稍稍下降后，在7.5 V出现饱和。而输出的微波频率会随着电压增大而慢慢降低。而输出相对功率则在工作电流饱和后，慢慢增大，大致呈现线性关系。

B. 改变谐振腔的有效长度，测量振荡频率和输出功率的关系曲线

提起教学，使其工作在标准电压 12.0 V，此时的工作电流约为 250 mA，转动频率，改变谐振腔尺寸，从而改变其微波频率，然后用频率计做频率测量，得到图 3，从图可以看出，转出相对功率和频率大致成正比。

表 I. 相对功率与驻波比和反射率关系

序号	E_{\max}	E_{\min}	ρ	Γ_0
1	101.0	97.9	1.032	1.57%
2	101.6	98.0	1.036	1.77%
3	102.5	99.0	1.035	1.72%

表 II. 节点位置测量表

序号 n	x'	x''	\bar{x}
1	89.5	90.9	90.2
2	113.9	115.5	114.7
3	138.8	140.1	139.45

C. 练习测量小驻波比和中驻波比

在[等幅]状态下，使频率显示为 9.000 GHz，电压为 12.0 V，调整好驻波测量线，利用单螺调配器改变测量线的终端状态，调节到匹配状态，测量小驻波比，如表 I

可以求出，这是的小驻波比为 $\bar{\rho} = 1.034$ ，反射率约为 1.69%。

D. 测量波导波长和驻波曲线

调节单螺调配器，使驻波测量线终端接近全反射（即 ρ 值较大），利用平均值法测量极小点两侧的等强点 x'_1, x''_1 ，用平均值的方式求得 $x'_{\min} = \frac{1}{2}(x'_1 + x''_1)$ ，这里则用三个波节作线性拟合： $x_n = \frac{\lambda_g}{2} \times n + c$ ，得到表 II，经过线性拟合后，可以得到波导波长：

$$\lambda_g = 49.20 \text{ (mm)}$$

E. 测量驻波曲线和 $I - |E|$ 曲线

在两个波节间，测量出不同位置的相对功率 P ，也即是检波电流 I ，可以得到图 4(a) 的图像，半高位置为 $l_1 = 88.7 \text{ mm}$ 和 $l_2 = 100.9 \text{ mm}$ ，半高宽为 $\Delta l = 12.2 \text{ mm}$ ，代入公式后计算得到：

$$n = \frac{-0.3010}{\lg \cos \frac{\pi \Delta l}{\lambda_g}} = 2.037$$

我们也可以通过 $|E|$ 和相对位置 l 的关系 $|E| \propto \sin \frac{2\pi l}{\lambda_g}$ ，画出 $I - E$ 曲线，如图 4(b) 所示，并且通过拟合的方式得到检波律：

$$n = 1.972$$

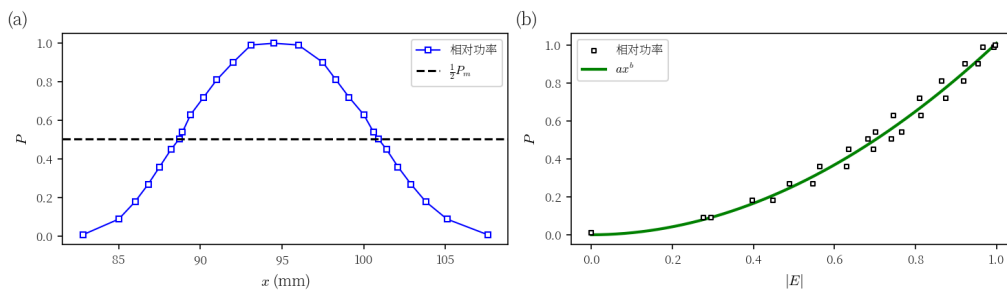


图 4. (a): 位置和相对功率的关系图，两边为波节位置；(b): 场强和相对功率的关系图，其中绿色为拟合曲线

计算出自由空间的波长为 (导管长边取为 $a = 22.86 \text{ mm}$):

$$\lambda = \frac{\lambda_g}{\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_g}{2a}\right)^2}} = 33.49 \text{ mm}$$

微波频率测得为 $f = 8.953 \text{ GHz}$ ，可以得到光速 c 、微波相速度 v_g 和微波群速度 u 为：

$$c = \lambda f = 2.998 \text{ km s}^{-1}$$

$$v_g = \lambda_g f = 4.405 \text{ km s}^{-1}$$

$$u = \frac{c^2}{v_g} = 2.041 \text{ km s}^{-1}$$

可以看出微波在波导中的传播相速度比光速要大，而群速度，则比光速要小。

VI. 结论

经过这次实验，可以得到波导管的工作特性，并且测量出微波在导管中的波导波长、相速度和群速度，并对光速进行了验证，

致谢

感谢王常生老师的贴心教导。

[1] 吴思诚 and 荀坤, 近代物理实验, 4th ed. (高等教育出版社, 北京, 2015).

附录 A: 思考题

1. 在 $a = 23.0 \text{ mm}$ 、 $b = 10.0 \text{ mm}$ 的矩形波导管中能不能传播 $\lambda = 2 \text{ cm}$ 、 3.0 cm 和 5.0 cm 的微波？各能传播哪些波型？

根据 $\lambda_c = \frac{2}{\sqrt{(\frac{m}{a})^2 + (\frac{n}{b})^2}}$ ，我们可以得到 $\lambda_{c,10} = 46.0 \text{ mm}$ 、 $\lambda_{c,01} = 20.0 \text{ mm}$ 、 $\lambda_{c,11} = 18.3 \text{ mm}$ 和 $\lambda_{c,20} = 23 \text{ mm}$ 。而波导管能够通频的条件为 $\lambda_c > \lambda$ ，即 5.0 cm 的波长不能通过，而 3.0 cm 的波长能以 TE_{10} 的模式传播。而对于波长为 2 cm 的微波，能以 TE_{10} 和 TE_{20} 的模式。