

体效应振荡器的工作特性和波导管的工作状态实验报告

本实验中，我们在了解耿效应基本原理的基础上，对于体效应振荡器的工作原理做出了基本的探索。而后我们利用其产生的微波在波导管中传输的模式，研究了波导管的工作状态。调节实验装置，复现了波导管的匹配，驻波，混波的三种状态。采用多种微波测量方法，对于波导管中微波的各种参量做了数值分析与计算。

关键词：体效应振荡器，波导管工作状态，微波测量

I. 引言

微波是波长很短的电磁波，一般指波长从 1mm 到 1m 范围内的电磁波。它的频率处在 300-300 000 MHz 范围内，所以也称为“超高频”，微波波段介于超短波和红外线之间，它又可以细分为“分米波”（波长为 1 10 dm）、“厘米波”，（波长为 1 10 cm）和“毫米波”（波长为 1 10 mm）。微波通常由一些特殊的微波电子管（如反射式速调管、磁控管等）产生。实验室里常用的小功率微波信号源用反射式速调管提供微波振荡。20 世纪 60 年代以后，出现了各种类型的微波半导体振荡器（如体效应振荡器和雪崩振荡器等）。这类器件的特点是体积小、重量轻、结构简单、使用方便、工作电压低，所以在许多场合里逐渐代替上述微波电真空器件做微波振荡源。本实验中使用的信号源就是用体效应振荡器产生微波振荡的。体效应振荡器主要由耿氏体效应二极管和谐振腔构成。他利用耿效应产生电流震荡，电流震荡通过电磁辐射产生微波，大部分以 TE₁₀ 状态在本实验的波导中传播。本实验我们通过外加不同电压并分析管波导中微波特性的方法研究体效应振荡器的工作特性。并用多种微波测量方法研究了微波在波导管中传播的不同状态。

II. 理论

体效应振荡器主要由耿氏体效应二极管和谐振腔构成。“耿效应”发生于导带中具有双能谷结构的半导体材料。以 GaAs 为例：在 n 型砷化镓单晶样品两端做上欧姆接触电极，当加电场大于每厘米几千伏特的临界阈值时，会产生频率很高的电流振荡，其振荡频率与样品的度成反比，大约等于载流子（电子）在电极间渡越时间的倒数。

具有双能谷结构的半导体材料有特殊的平均电子漂移速度与电场特性。其特点是，在低场下，平均电子漂移速度随电场线性增加，而当电场超过某一阈值时，电子漂移速度随电场的增加反而减小，微分迁移率是负的。也就是说，外加电场在大于某一阈值的一定区域内变化时，出现负微分迁移率现象。

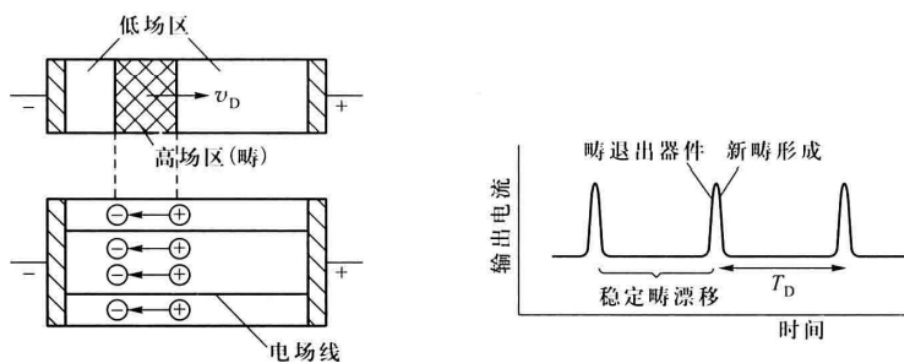


图 1. 耿效应示意图

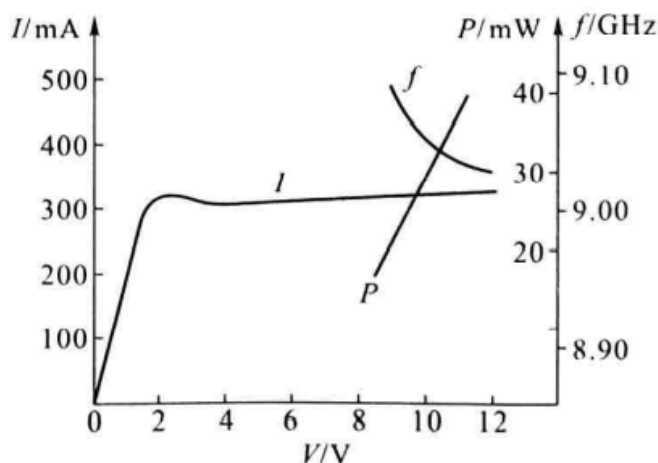


图 2. 体效应振荡器工作状态

如果我们在 n-GaAs 样品上使偏压加到负斜率区, 样品内部的电场及电子分布将不再是均匀的. 不同区域, 由于电子迁移速度不同而, 形成所谓的电子积累层和电子耗尽层. 当这个“偶极层”内的电场由于电子的进一步积累和耗尽, 而变得越来越大时, 就形成高场畴. 高场畴作为一个整体在外电场的作用下, 以一定的速度向阳极运动, 到达阳极便消失.

新的高场畴又在阴极附近迅速形成并重复上述过程, 畴的生长、运动和消灭是一个周期性的过程. 在它完全形成和渡越的过程中, 样品的输出电流小且稳定, 但当畴消失时, 电流突然增大, 从而形成周期性的变化。如图. 这个周期性变化的电场就会产生微波频率的辐射。图??所示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, 就形成了一个微波辐射源。体效应振荡器的工作特性如图??给出的组典型曲线所示. 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, 几乎线性增加, 而当电压超过國值时, 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, 随着工作电压的增加, 输出功率增加而振荡频率降低.

一般说来, 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

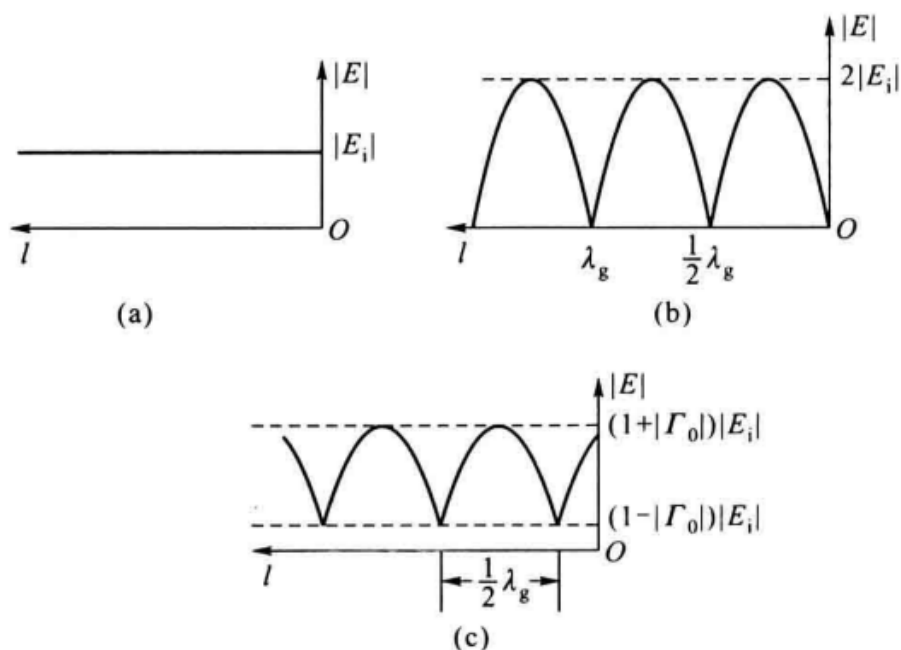


图 3. 波导管三种工作状态, 入射波与反射波叠加态为 $E_y = E_i e^{i\beta l} [1 + |\Gamma_0| e^{-i(2\beta l - \phi)}]$, $\Gamma = |\Gamma_0| e^{i\phi}$ 是反射系数

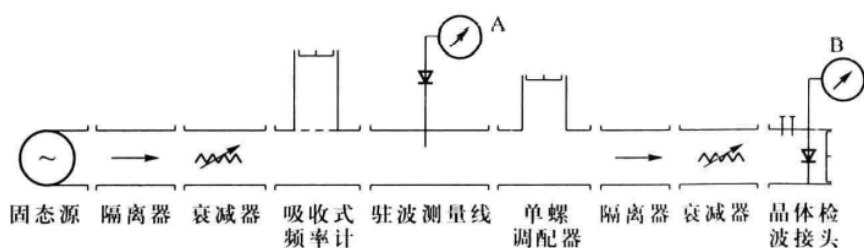


图 4. 实验装置示意图, 主要原件有固态源, 隔离器, 衰减器, 吸收式频率计, 驻波测量线和单螺调配器

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、驻波状态和混波状态, 它们的电场分布曲线分别如图??所示. 在匹配状态, 由于不存在反射波, 因此在波导传播方向光强不变; 驻波状态, 终端发生全反射, 电场以驻波的形式存在于波导头尾两个导体版中, 混波状态, 终端部分反射, 电场绝对值在最大值与最小值之间震荡波导管中. 对于波导中传播的横电波, 以 TE_{10} 波为例, 波导波长 $\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}}$, 大于自由空间波长, $c = \lambda f$, $v_g = \lambda_g f$, v_g 为波在波导管中传播的相速度, 显然大于光速 c 相速度 v_g 与群速度 u , 具有如下关系式

$$v_g u = c^2$$

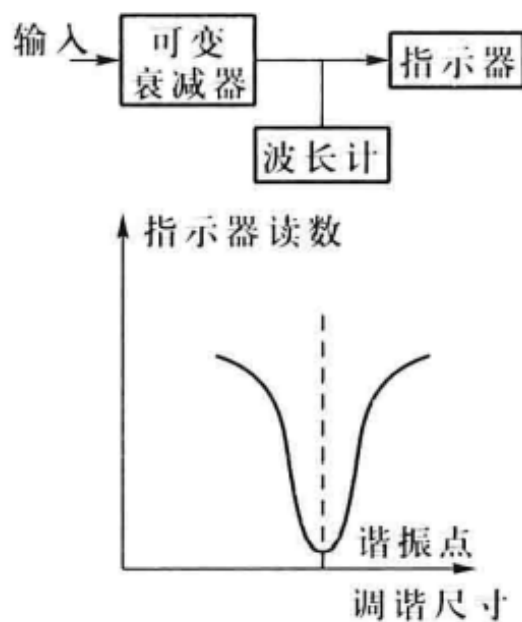


图 5. 频率计

III. 实验装置

图??是本实验使用的实验装置示意图, 微波信号由固态源提供. 它主要由体效应振荡器、调制电路和电源三部分构成, 具有微波等幅输出, 内方波调制及外调制功能. 用数字表显示工作频率、体效应管的工作电压和电流、整个微波测量线路由 3cm 波段波导元件组成. 主要元件有隔离器、衰减器、吸收式频率计、驻波测量线和单螺调配器. 隔离器控制微波单向传播, 屏蔽了来回反射的微波对实验效果的影响. 衰减器控制微波强度衰减. 吸收式频率计采用谐振腔法对微波频率进行测量, 用吸收法连接谐振腔与波导, 当谐振腔调谐于待测频率时, 被吸收的能量最多此时指示器的读数会有一个很大的降低, 如图??所示 此时就可以读出传输于波导中的微波的频率。

在测量驻波比时, 驻波波腹和波节的大小由检波晶体的输出信号测出. 晶体的检波电流 I 和传输线探针附近的高频电场 E 的关系必须正确测定. 根据检波晶体的非线性特征, 可以写出 $I = kE^n, n=1$ 称为直线性检波, $n=2$ 成为平方律检波。可以按照如下方法确定 n 的值。令驻波测量线终端短路, 此时驻波振幅与终端距离 l 的关系为

$$|E| = k_2 |\sin 2\pi l / \lambda_g|$$

, 由实验测量两个相邻波节之间的驻波曲线 $I(l)$, 就可以按照下面的关系式定出 n :

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

驻波测量线是测量微波传输系统中电场的强弱和分布的精密仪器, 其简单原理是: 使探针在开槽传输线中移动, 将一小部分功率耦合出来, 经过晶体二极管检波后再由指示器指示, 从而看出在开槽线中电场分布的相对强度. 检波晶体管的检波电流 I 与管端电压 V 有关, 而 V 与探针所在处的电场 E 成正比, I, E 满足关系式: $I = kE^n$, 其中 k, n 为常量.

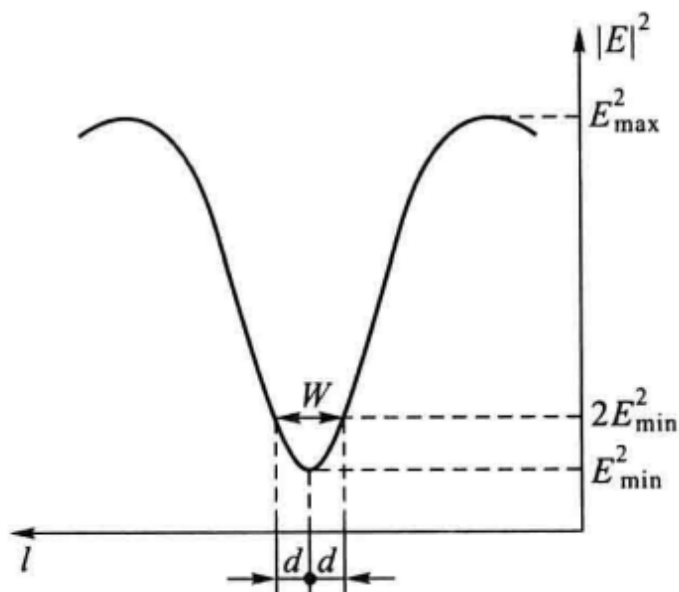


图 6. 二倍极小功率法示意图

在小功率情况下, 可以相当精确地认为 $n=2$, 即平方律检波. 但在比较精确的测量中, 本实验中对于平方检波率的符合比较准确. 小驻波比的测量: 需要多测几个驻波波腹和波节, 按照下式计算驻波比 ρ 的平均值

$$\rho = \frac{E_{max1} + E_{max2} + \dots + E_{maxn}}{E_{min1} + E_{min2} + \dots + E_{minn}}$$

中驻波比的测量 ($1.5 < \rho < 10$) 只需测一个驻波波腹和一个驻波波节, 按下式计算

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

大驻波比测量需要使用二倍极小功率法, 经过理论推导可得

$$\rho = \frac{\lambda_g}{\pi W}$$

$W=2d$ 如图??所示

IV. 实验及数据分析

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。将信号源的“工作方式选择键”置于“等幅”状态, 打开电源开关, 这时面板上所有的数字显示器应有显示. 调节“频率”钮, 使频率读数为 9.000 GHz(或者在 8.700 9.300 GHz 之间选一频率读数). 预热 30 min. 按下“教学”方式键, 保持“频率”钮位置不变. 通过“电压”调节钮, 在 0 13.0V 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, 通过测量装置中的频率计和光点检流计 B, 测出微波频率和相对功率. 测量过程中适度调节短路活塞和单螺调配器, 使晶体检波接头的输出最大. 晶体检波头处电场

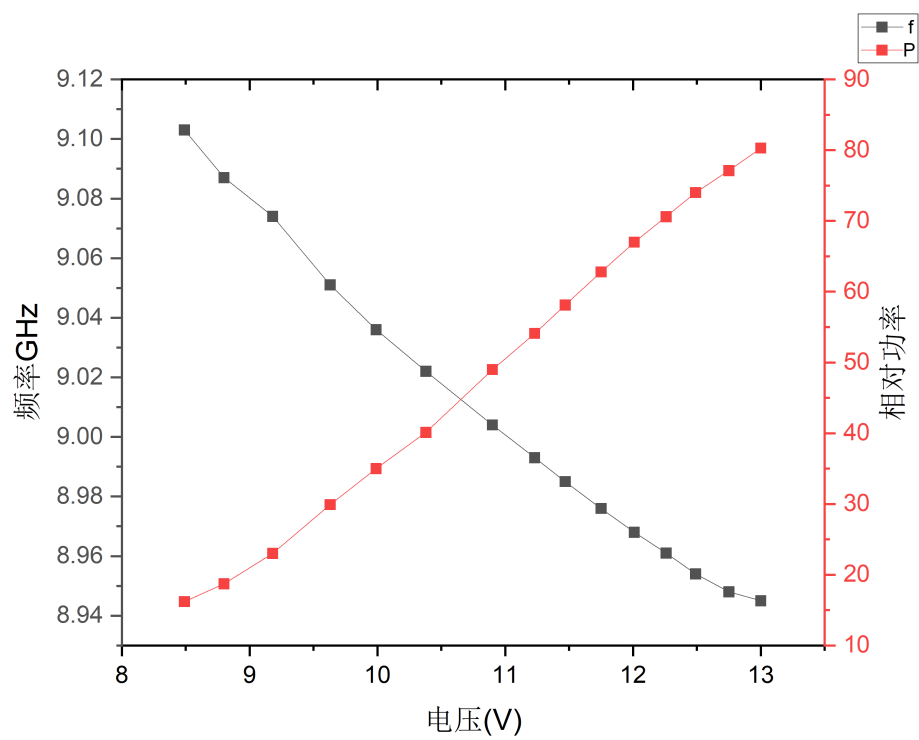


图 7. f,P 随电压变化曲线

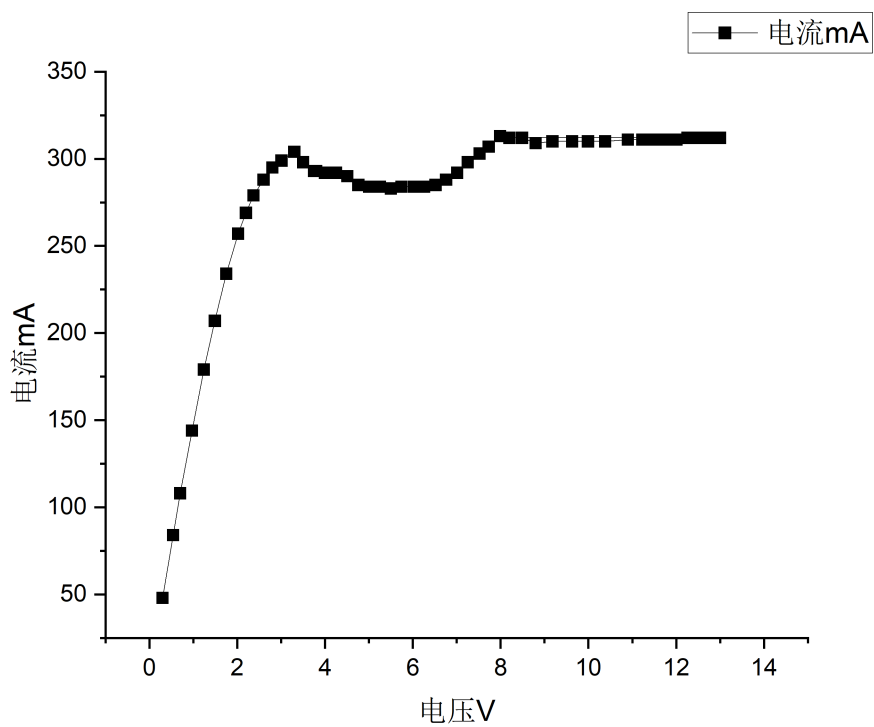


图 8. 伏安特性曲线

表 I. 体效应振荡器辐射区的部分数据

电压 (V)	电流 (mA)	相对功率 P	频率 (GHz)
13	312	8.945	80.3
12.75	312	8.948	77.1
12.49	312	8.954	74
12.26	312	8.961	70.6
12.01	311	8.968	67
11.75	311	8.976	62.8
11.47	311	8.985	58.1
11.23	311	8.993	54.1
10.9	311	9.004	49
10.38	310	9.022	40.1
9.99	310	9.036	35
9.63	310	9.051	29.9
9.18	310	9.074	23
8.8	309	9.087	18.7
8.49	312	9.103	16.2

表 II. 匹配状态下移动驻波测量线位置得到的最大和最小电流值

最大相对电流	最小相对电流
64.2	50.3
63.5	48.7
64.8	52.3
64.4	50.9

为振幅的四倍。注意频率计测得频率后应随即使其失谐。表??是体效应振荡器辐射区的部分数据

可以看出在低场下，平均电子漂移速度随电场线性增加，即很好的符合了欧姆定律。当电场大于一定阈值时，体效应振荡器产生了耿效应，因而发出微波辐射。随着电压的增大，电流的变化平缓，震荡电流的频率减小，但微波辐射功率增大。因此可以根据对工作频率和输出功率的要求选择适当的工作点。当然，由于不同体效应振荡器中微观情况各不相同，因此振荡器的工作特性一般来说是不相同的。

2. 观察波导管的工作状态。调节体震荡效应器至等幅状态。调节单螺调配器改变测量终端状态，练习调节匹配并测量驻波比。表??匹配下的移动驻波测量线位置得到的最大和最小电流值，根据公式

$$\rho = \frac{E_{max1} + E_{max2} + \dots + E_{maxn}}{E_{min1} + E_{min2} + \dots + E_{minn}}$$

以及平方检波率我们可以计算出驻波比

$$\rho = 1.127$$

表 III. 中驻波比状态下移动驻波测量线位置得到的最大和最小电流值

最大相对电流	最小相对电流
101.1	24.9

表 IV. 中驻波比状态下移动驻波测量线位置得到的最大和最小电流值

	x(mm)	x'(mm)
1	167.50	164.00
2	142.90	139.60
3	118.20	115.00

反射系数

$$|\Gamma_0| = \frac{\rho - 1}{\rho + 1} = 0.0598$$

实验中由于微波模态不纯，隔离器误差，几何因素导致的微波来回反射等原因，即使将单螺调配器抬至最高，也不能完全匹配到驻波比等于 1 的状态。

调节中驻波比，只需将单螺调配器拧下部分高度即可。驻波比

$$\rho = \sqrt{\frac{I_{max}}{I_{min}}} = 2.015$$

$$|\Gamma_0| = \frac{\rho - 1}{\rho + 1} = 0.061$$

3. 测量波导波长两个极小值之间距离的二倍为波导波长。采用平均值法，即极小值附近电流示数相同的两点位置的平均值作为极小值的位置。表??为平均值法的测量数据。计算结果

$$\lambda_g = 49.15mm$$

频率计测得

$$f = 8.967GHz$$

算出空间波长

$$\lambda = \frac{\lambda_g}{\sqrt{1 + (\frac{\lambda_g}{2a})^2}} = 33.46mm$$

光速

$$c = f\lambda = 3.002e8m/s$$

相速度

$$v_g = f\lambda_g = 4.41e8m/s$$

群速度

$$u = \frac{c^2}{v_g} = 2.044e8m/s$$

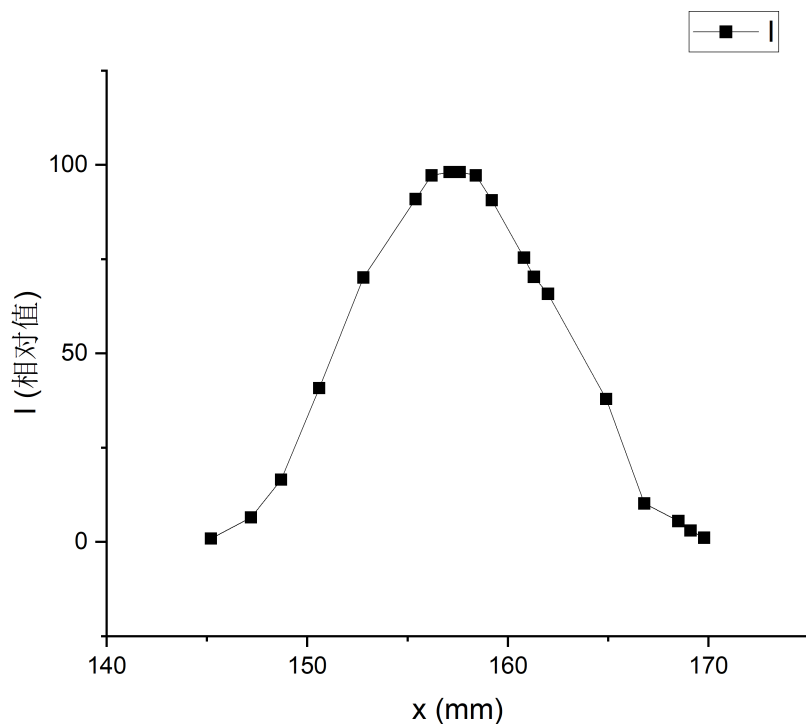


图 9. 终端短路状态下 I(l) 曲线

3. 测量相邻两个波节之间的驻波曲线，做出晶体管 I-|E| 曲线。首先调节单螺调配器使终端短路，取电场的驻波波节为参考点，在两个波节之间连续测量，获得 I(l) 曲线。如图??所示。终端短路时有

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

由上式算出 E(l), 即可画出 I-E 曲线, 如图??所示

实验测得 $I_m/2$ 处分别为 151.7mm 和 164.3mm 根据公式可计算检波律 n

$$n = \frac{-0.3010}{\lg \cos(\pi \Delta l / \lambda_g)} = 1.89$$

V. 思考题

mn 模式的电磁波在波导中的截止波长

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

大于此波长的电磁波不能以此模式传播，不同模式 mn 的截止波长如表??所示 可见对于 20mm 电磁波，可传播波形为 TE₁₀, TE₂₀, (TE₀₁ 为临界状态物理上不考虑，现实中不可行)；对于 30mm 电磁波，仅 TE₁₀ 可以传播；对于 50mm 电磁波，不能在此波导中传播。

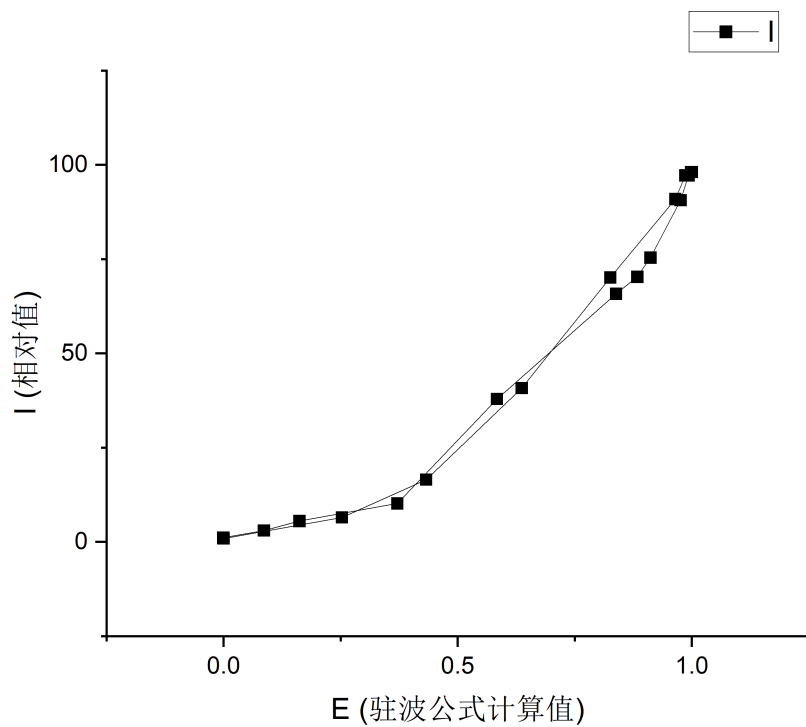


图 10. 终端短路状态下 I-E 曲线

表 V. 不同模式 mn 的截止波长

m	n	截止波长 (mm)
1	0	46
0	1	20
0	2	10
1	1	18.3414
2	0	23
0	3	6.66667
1	2	9.77176
2	1	15.09211
3	0	15.33333

VI. 结论

本实验中，我们在了解耿效应基本原理的基础上，对于体效应振荡器的工作原理做出了基本的探索，画出了其伏安特性曲线，以及辐射功率与频率随外加电压的变化曲线，并对其工作特性做了基本的分析。而后我们利用其产生的微波在波导管中传输的模式，研究了波导管的工作状态。调节实验装置，复现了波导管的匹配，驻波，混波的三种状态。并熟练了频率计，驻波测量线等微波测量元件的基本使用方法。并在驻波状态下探究了晶体检波头的检波率。以及对于微波的各个参量做了数值分析与计算。

VII. 致谢

杜红林老师在实验中的耐心辅导，以及他提供的充分资料对于我对实验的领悟有重要帮助，在此致谢。