

微波技术实验

微波通常指频率在 300 兆~到 30000 兆之间的电磁波。微波的特点既不同于一般的无线电波，又不同于光波，它是波谱学中不可缺少的部分，许多重要的物理实验都要用到微波。例如铁磁共振、微波电子自旋共振、约瑟夫森效应，微波等离子体测量等等。

微波的波长比地球上的一般物体的几何尺寸要小得多，其衍射效应可以忽略。此时微波的特点与几何光学很接近，不象一般无线电波，可以绕过山峰和建筑物，而是在空间沿直线传布，遇到障碍物会象光线一样反射回来，所以被用于雷达技术。当微波遇到与其波长相近的物体，则往往表现出衍射、干涉等类似物理光学的特性。

微波的频率较高，可以畅通无阻地穿过地球周围的电离层，是进行卫星通信、宇航通信和射电天文观测研究的一种有效手段。微波还具有其量子特性，微波作为一门独立学科得到人们的重视和迅速发展。

1. 微波信号源

在微波电子自旋共振实验中，微波能量是由微波信号源提供的，因此要求微波源的频率可调，并且有良好的频率稳定性和合适的输出功率。

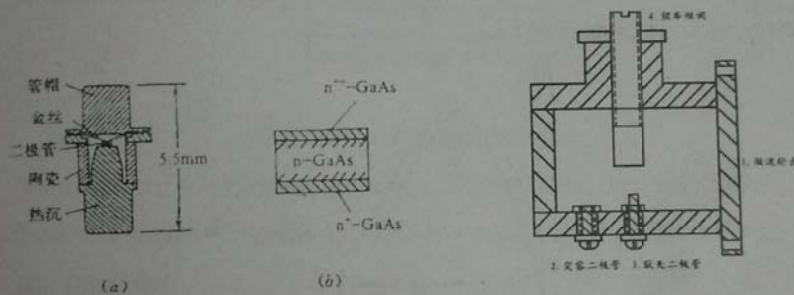


图1 体效应二极管的剖面及机构

微波源可按使用的是电子管还是固体电子器件而分为两大类。前者使用反射速调管、行波管和磁控管等；后者则用体效应管、雪崩管及微波晶体管等。由于后者具有体积小、重量轻、耗电省及便于集成等优点；近几十年来，发展极其迅速，使微波整机向全固体化乃至全集成化方向发展，具有强大的生命力，尤其在中小功率范围内它已取代微波电子管。采用体效应振荡器制成的微波信号源具有噪声低、工作电压低和便于电调谐的优点。由于体效应管中的微波电流振荡现象是耿氏(J.B.Gunn)于1963年首先发现的，所以体效应二极管也称为耿氏二极管。它的封装剖面、结构图分别如附图-1a和b所示，其主要部分为中部的一块n型GaAs单晶半导体材料，上、下两层均为低阻接触层，当两端加上一定的直流偏压时，即可在n型GaAs体内产生微波振荡，所以称为体效应二极管。体效应管是利用其伏-安特性中

的微分负电阻特性(见附图-2), 把直流能量转换为微波能量, 这种微分负电阻特性来自 n 型 GaAs 材料的特殊能带结构, 如附图-3 所示。导带能带中有高、低两个能谷, 两能谷间能量差 ΔE 为 0.36eV, 小于其禁带宽度 $E_g = 1.43\text{eV}$, 但远大于热运动能量 kT 。由于低能谷能带附近的曲率比高能谷附近曲率大, 因此造成两能谷内电子特性有明显的差异, 电子在低能谷内迁移率 $\mu_1 (= 5000 \sim 8000 \text{cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s}))$ 比在高能谷中的 $\mu_2 (= 100 \sim 200 \text{cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s}))$ 大几十倍, 而高、低能谷内的电子态密度之比高达 60 以上, 因此在外电场 ϵ 的作用下, 电子的平均速度可写成

$$\bar{v} = \mu \epsilon = \frac{n_1 \mu_1 + n_2 \mu_2}{n_1 + n_2} \quad (\text{附 2-1})$$

式中 μ 为平均迁移率, n_1 和 n_2 分别为低、高能谷内的电子浓度。当电场小于阈电场 ϵ_m 时, 由于 $\Delta E \gg kT$, 电子主要在低能谷。当 $\epsilon > \epsilon_m$ 时, 电子在外场中被加速, 获得的能量虽小于 E_g , 但大于 ΔE , 所以出现如附图 3 所示的电子由低能谷向高能谷转移的电子转移现象, 导致 μ (从而平均电子速度 \bar{v}) 随 ϵ 增加而单调下降的微分负电阻特性, 直到 $\epsilon = \epsilon_m$ 时, 低能谷中的电子全部被转移到高能谷, 电子转移效应是体效应的物理基础, 所以体效应也称为电子转移器件, v 与 μ 的关系如附图-4 所示。

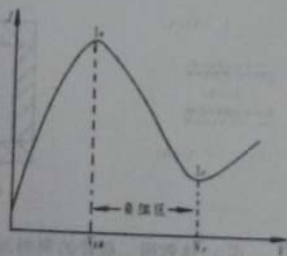


图 2 体效应二极管的伏-特性

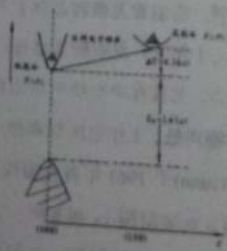


图 3 n-GaAs 的能带结构及电子从低能谷到高能谷的转移

为了提高体效应管振荡器的频率稳定性、降低噪声、扩展调频范围和提高效率，必须把体效应管与特定的谐振电路结合起来。一个好的选择是用体效应管作为有源元件做成模波导谐振腔振荡器，如附图-5 所示。其调谐方式有调谐杆机械调谐和变容二极管电调谐两种。

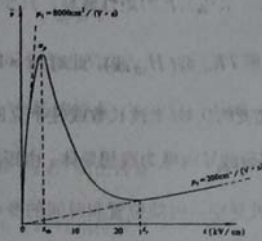


图 4 具有理想双谷特性的半导体的电子平均速度随电场的变化

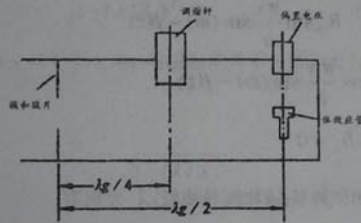


图 5 矩形波导体效应管振荡器结构

GaAs 材料制成的体效应管对温度很敏感，可用恒温、补偿、锁定等技术或采用温度系数低的殷钢制造谐振腔等措施来提高频率稳定性。如采用介质谐振腔则频率纯度会更好。

2. 波导传输线

微波能量的传输离不开平行双线、同轴线、波导管和微带线等传输线。它们的需要，传输不同的波型，前三种使用较早，后一种发展很快，具有小型、轻量、集成化等优点。

同轴线由内导体和一根环绕它的同心管形外导体组成，其间充有绝缘介质是电、磁场仅分布在横截面上而无纵向分量的横电磁波(TEM 波)。在横截面上，磁力线为环绕内导体的闭合同心圆，而电力线则与磁力线垂直，沿圆环的径向。

波导是空心金属管的总称，按截面形状不同分为矩形波导和圆波导两大类。前者使用较多，而后者因谐振特性优异、加工方便，用于频率计等场合。为减少内壁损耗，内壁有较好的光洁度，并镀银以提高电导率。由于空心波导中无任何导体，故不能传输 TEM 波，但能传输横电波(TE 波)和横磁波(TM 波)，TE 波的特征是电场为纯横向，故得名：它还具有纵向

磁分量，所以又称为(纵向)磁波(H波)。TM波与TE波相反，其磁场是纯横向，因具有纵向电场分量，所以又称为(纵向)电波(E波)。TE波和TM波均可有无穷多个波型，常写成 TE_{mn} 和 TM_{mn} 波，下标 m, n 分别为包括零在内的正整数。为实现单一波型(单模)传输，常把波导尺寸设计成标准化，宽边为 a ，窄边为 b 的矩形波导，只要满足 $b = (0.4 - 0.5)a$ 的关系，波导就只传输 TM_{mn} 的最低模，即 TE_{10} 波(H_{10} 波)，此时 $m=1, n=0$ 。下面将看到 m 和 n 分别代表电磁波沿宽边和窄边交变的次数(半波长数或驻半立波数)，当 m 或 n 为零时表明电磁场在相应方向保持恒定。假设波导内壁为理想导体。由矩形波导的边界条件求解麦克斯韦方程，可得 TE_{10} 波电磁场在波导空间内随位置和时间变化的变化：

$$\begin{aligned}
 E_y &= i \frac{\omega \mu a}{\pi} B_{10} \sin \frac{\pi x}{a} \sin(\omega t - \beta z) \\
 E_x &= -i \frac{\beta a}{\pi} B_{10} \sin \frac{\pi x}{a} \sin(\omega t - \beta z) \\
 B_z &= B_{10} \cos \frac{\pi x}{a} \sin(\omega t - \beta z) \\
 E_z &= E_x = B_y = 0
 \end{aligned}
 \tag{附 2-2}$$

式中相位因子 β 和相位波长(或称波导波长) λ_g 分别为

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g}, \quad \lambda_g = \lambda \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c)^2}$$

$\lambda = c/v$ 为自由空间波长；而 $\lambda_c = 2a$ 为截止波长，是波导中能通过的电磁波波长的上限，它是波导传输线最重要的传输特性参数，常根据它来确定波导尺寸。只有波长小于 λ_c 的电磁波才能在波导中传输，所以矩形波导实际上是一个高通滤波器，因此才能实现单模传输。

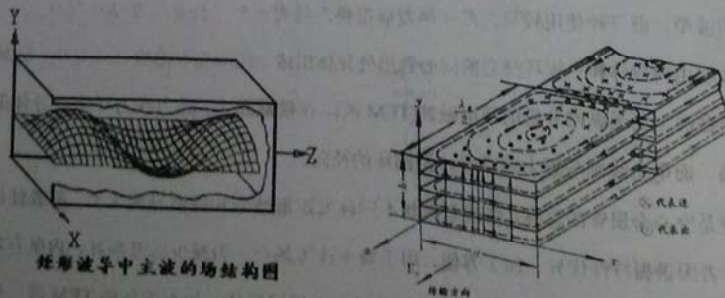


图6 矩形波导中 TE_{10} 模行波电磁场结构图

TE_{10} 波在某一瞬间的电、磁场分布(场结构)如附图-6所示。它具有TE波的共同特点。横向电场 E_y 垂直于宽边,在中部最强,向两侧逐步下降至边沿附近为零,即电场在宽边上有一个驻半立波, $m=1$ 。电力线如附图中实线所示。同样,磁场 B_x 和 B_z 也在宽边方向有一个驻半立波。这两个磁场分量在与宽壁平行的平面内形成合成磁场,如闭合磁力线(虚线)所示,由于 $n=0$,全部电、磁场分量在窄边方向无变化,即其驻半立波数为零。值得注意的是电场和磁场间的相位具有行波场的特点,宽边方向的磁场 B_x 与窄边方向的电场 E_y ,在传输方向同相位,而纵向磁场 B_z 与 E_y 则在传输方向上有相位差 $\pi/2$ 。

综观整个场结构,它在传输方向以相位波长 λ_g 作周期性变化,并以相位速度

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c)^2}} \quad (\text{附 2-3})$$

沿传输方向传输。这里,相速度大于光速,与相对论并不矛盾,因为相速度只代表相位的传播速度,而群速度

$$v_g = \frac{c^2}{v_p} = c\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c)^2} \quad (\text{附 2-4})$$

才真正代表微波能量或微波信号的传输速度。此外,由于 v_p 与 v_g 均与波长 λ 有关,它们均为色散波,仅在 $\lambda = \lambda_c$ 时才相等。

当 TE_{10} 波在波导中传输时,在波导内壁表面厚为 $10^{-4}cm$ (趋肤深度)的表层内将感应产生管壁电流,如附图 2-7 所示,其分布的最大特点是宽壁中心线上管壁电流最小。

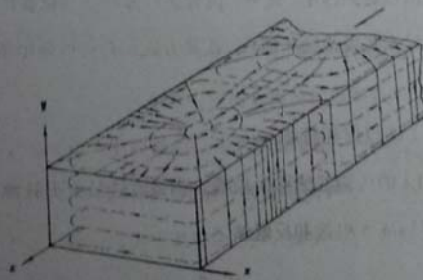


图 7 TE_{10} 波的管壁电流结构

矩形波导中的 TE_{10} 电磁波的场结构及其感应的管壁电流分布,对于设计波导元件和波

导中电磁波的激励与耦合装置，具有重要的指导意义。所谓激励是指向波导传输微波能量以激励所需的电磁波；耦合则是激励的逆过程，是从波导中取出部分能量。激励波导，必须在波导壁上开槽或打孔，然后通过它们直接进行激励或者放置探针或小环等激励装置。开槽或打孔安放激励装置时必须遵循两个原则：一是开槽要注意对管壁电流分布的影响；二是激励装置要放在拟激励的电磁波的电场或和磁场最强的地方，以达到最佳的激励效果。因此，矩形波导宽壁中心线是开槽最理想之处，它切割的电流线最少，可把开槽引起的微波能量向外辐射和由此引起的反射减小到最小，显然，开窄槽更为有利。激励方式通常有电激励和磁激励之分，前者是通过激励装置的电偶矩来激励，而后者则是通过激励装置的磁偶矩来激励。电激励用的探针常放在宽壁中心线上电场最强处，如附图-8所示，

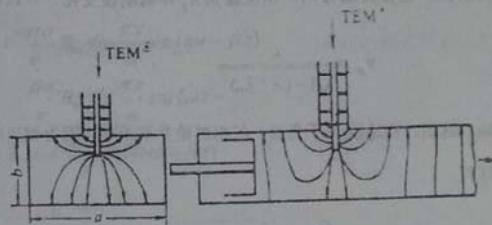


图 8 同轴线通过小天线激励把矩形波导中 TE_{10} 模式

通过伸入波导内部的探针(同轴线内导体的延长段)，在波导中激励 TE_{10} 波，使它沿波导纵向传输。根据互易定理，这种激励装置也可作为耦合装置用，同轴矩形波导转换器就是为此而设计的，它可把同轴线中 TEM 波的能量转变为波导中的 TE_{10} 波能量，其结构是在一段空波导终端的拆卸面前焊接一只 N 型接头，与接头相连的探针插入波导并使拆卸面的反射和探针的反射相互抵消以达到匹配。此外，波导之间或波导与谐振腔之间，常通过其公共壁上的小孔对微波的绕射来实现激励和耦合，就其方式而言可以是电激励也可以是磁激励，或两者兼而有之。

下面介绍传输线上的反射和驻波。

纵向长度大于 0.1λ 的传输线统称为长线。当微波能量无损耗地从长线传输到负载时，长线 dz 段上的电压可写为入射波和反射波之：

$$V = V_1 e^{j\beta z} + V_2 e^{-j\beta z} \quad (\text{附 2-5})$$

这里 z 方向是从负载指向微波源，为描述反射的大小，定义反射波电压与入射波电压之比为电压反射系数(简称反射系数)：

$$\Gamma = \frac{V_2}{V_1} e^{j(\phi_2 - \phi_1 - 2\beta z)} \quad (\text{附 2-6})$$

式中 ϕ_1 和 ϕ_2 分别为 V_1 和 V_2 的幅角, 取 Γ 的模:

$$|\Gamma| = \frac{V_2}{V_1} \quad (\text{附 2-7})$$

则复数 Γ 变为一个与 z 无关的实数 $|\Gamma|$, 其值随负载不同在 0 和 1 之间变化。

反射波与入射波会在长线上相干产生驻波。长线上电压的最大与最小值之比称为电压驻波比(简称驻波比) ρ :

$$\rho = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{V_1 + V_2}{V_1 - V_2} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (\text{附 2-8})$$

实际上, $|\Gamma|$ 和 ρ 是从不同角度来描述同一物理现象, 且两者是可以互相换算, 长线上有行波、驻波和混波等三种典型的传输状态, 第一种是负载的反射系数为零的匹配状态, 相应的驻波比为 1, 此时长线上各点的电压平均值保持常数, 传输纯行波。第二种为全反射状态, 负载的反射系数为 1, 相应于 ρ 趋向无穷大, 传输纯驻波。第三种状态介于前两者之间, 反射系数在 0 与 1 之间, ρ 为大于 1 的有限值, 由于长线上既有行波也有驻波, 故称为混波状态。从能量角度讲, 匹配状态相应于负载吸收全部微波功率, 全反射状态相应于负载对微波功率全部反射, 混波状态则相应于负载部分吸收和部分反射微波功率的中间状态。

3. 微波测量仪器

微波测量仪器主要有功率计、波长计(频率计)及测量线, 分别用于测量微波信号的功率、频率和驻波比

3.1 功率计

功率计是利用热电偶的塞贝克效应测量微波平均功率的专用仪器, 具有灵敏度高、稳定性好和频率覆盖范围宽的优点。它由功率探头和指示器两部分组成。探头用铂-铱热电堆膜片构成, 既用作热电换能器又作为吸收微波功率的匹配负载。热电偶的温差电动势(与所吸收的微波平均功率成正比)由同轴线引出, 经放大和定标后转换为功率读数数值。这种功率计的缺点是测量误差较大, 主要来自失配误差。此外, 探头的抗过载能力差, 使用不当时易于烧毁。

功率计的探头部分有同轴波导转换接头, 以便测量时与波导系统连接。连接时要注意下述两点: 一是波导矩形截面要相互对齐; 二是波导拆卸面(短路面)之间要保持密合和良好的

电接触，紧固穿孔螺丝时要松紧恰当，过松造成接触不良，而过紧则易损坏拆卸面。使用时，还要防止撞击和损伤波导及拆卸面，更不要接触或擦伤波导管的镀银内壁。

测量功率时，必须先开机预热功率计，并校正零点。测量时要注意恰当选择探头的衰减倍率，量程选择要逐步由大到小，以免烧坏探头，小量程(特别是最低量程)时，应经常校正零点。

3.2 吸收式波长计(频率计)

它是利用谐振法来直接测量微波频率的仪器。为提高测量精度，特选用谐振特性优异的圆柱形谐振腔，壁端可做成无接触式的活塞，其品质因素可高达几万。波长计由传输波导的圆柱形谐振腔构成，通过丝杆、螺母传动机构移动活塞调节腔长以改变谐振频率，频率值则由波长计外圆筒上的刻度读出。测量频率时，按其连接方式分为通过式和吸收式两种，对后者，当微波信号的频率与谐振腔谐振频率一致时，谐振腔吸收一部分微波能量，使通过波导传输到负载端的功率突然下降，波长计的精度一般为 10^{-3} ，高档的可达 10^{-4} 。注意，当波长计接在微波系统中不作频率测量时，应使之失谐，以免对测量系统带来不利的影响。

3.3 测量线

测量线是微波测量中的重要测量仪器。它有一个矩形波导，但在宽壁中心开一纵向狭窄长槽，槽中有一个可沿槽移动的带有晶体检波器的探头。探针从槽中伸入波导，与电磁波耦合以提取少量微波功率，用来测量电磁场幅度沿槽的分布，从而测得驻波比、波导波长及负载阻抗等。探针调谐回路实质上是一个调谐的同轴谐振器，仅当谐振时才有最大的检波输出。探针在主波导中的穿伸度通过螺丝可上下调节，调谐活塞位置由顶部螺丝上下调节，整个探针架置于探头座上，可通过转动旋钮沿槽移动，探针位置由游标尺读出，精度可达 $(0.05)\text{mm}$ 。测量线是微波精密测量仪器，调整和使用中要特别细心。测量前必须正确进行调整，主要是选择合适的探针穿伸度，并使探头调谐，一探针的引入可等效地看成与传输线并联的导纳，电导的分流作用使测得的电场幅值偏小，而电纳则会使驻波相位发生偏移，对波腹位置有较大的影响。对于X波段测量线，探针穿伸度取波导窄边尺寸的 $10\sim 15\%$ 为宜。电纳的影响可通过调节探头的谐振来消除。

3.4 选频放大器

为提高测量线的测量灵敏度，输入信号用 1kHz 方波进行调制，用选频放大器测量输出信号的幅度。选频放大器是一个高增益、低噪声、具有选频特性的放大器。使用中要注意合理选择增益和频带范围，以保证其稳定工作。指示用的表头有两种刻度：一种是均匀分格读数，可直读信号的大小；另一种是驻波比刻度，它的满刻度作为驻波电压的波腹读数，把测