

微波段金属表面问题的基本理论和测量(续)

黄志洵

(中国计量科学研究院)

本文是对文献[1]的补充,讨论限于非超导体金属。

物理状况^[2]。总之,从30兆赫到30千兆赫,金属电导率的问题(特别是表面问题)是重要的课题。

一、金属电导率问题的提出

金属的电导率是一个物理参量,它的定义在直流情况下是比较明确的,即金属内传导电流密度 \mathbf{J} 与所施加的恒定电场场强 \mathbf{E} 的比,可用

$$\mathbf{J} = \sigma_0 \mathbf{E} \quad (1)$$

表示,式中 σ_0 是直流电导率^[2]。 σ_0 可用下式表示,即

$$\sigma_0 = \frac{n_e e^2 l}{m v_F} \quad (2)$$

式中 e 是电子电荷, m 是电子质量, l 是导电电子以平均速度飞行的平均自由程, v_F 为无外场时电子的平均速度(热运动平均速度), n_e 为电子浓度, σ_0 的倒数 ρ_0 是直流电阻率。直流电导率的测量可用精密的直流比较电桥进行,加工良好的样品的 σ_0 可以 0.5—1% 的精度加以确定。

然而,怎样在几十兆赫的射频确定金属的电导率? 这个问题至今没有很好解决。根据1960年以前国外的研究工作,认为在射频时的电导率与直流之差小于 10% 是保守的。因此, Allred 和 Cook 假定在射频时的电导率比直流小 5%^[3], 这样取值后估计电导率值将准确到 $\pm 5\%$ 以内。这实际上是说在射频时的电导率可在 $(0.9-1)\sigma_0$ 范围内取值。Adair 指出,截止波导的各有关物理参数中,仅有“有效射频电导率”(Effective RF Conductivity)是不能以高精度确定的物理量^[4]。

在微波,设计工作者也很关心金属表面的

二、金属电导率与频率的关系式

设外加交流电场 \mathbf{E} (角频率 ω) 到金属导体上,导体中单个电子的运动服从以下方程:

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} + b\mathbf{v} = -e\mathbf{E},$$

式中 \mathbf{v} 为电子速度, b 为电子粘滞阻尼系数。取 $\mathbf{E} = iE_m e^{-j\omega t}$, $\mathbf{v} = i v_m e^{-j\omega t}$, 则上式成为

$$(-j\omega m + b)v_m = -eE_m,$$

故得

$$v_m = -\frac{e}{b - j\omega m} E_m,$$

因而得到电子迁移率为^[5]

$$\mu_e = \frac{v_m}{E_m} = -\frac{e}{b - j\omega m},$$

故可推出金属的电导率为

$$\sigma(\omega) = -en_e \mu_e = \frac{n_e e^2}{b - j\omega m}. \quad (3)$$

规定 $\sigma(\omega) = |\sigma(\omega)| e^{j\theta(\omega)}$, 则得

$$|\sigma(\omega)| = \frac{n_e e^2 / b}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega m}{b}\right)^2}}, \quad (4)$$

可见 $\sigma(\omega)$ 是一个连续复函数。当 $\omega = 0$, 得到直流电导率(实数)为

$$\sigma_0 = \frac{n_e e^2}{b}. \quad (5)$$

当 $\omega \neq 0$, 总有 $|\sigma(\omega)| < \sigma_0$, 严格讲 σ 不是实数。

这种物理现象只有在波长为 1 毫米的几分之一时(红外区),才是显著的;其时电磁振荡

的周期可与电子碰撞的平均时间相比拟。本节虽然很好地说明了“复电导率是频率的函数”这样的概念,却不能解释几十兆赫时的情形。

三、趋肤效应与表面粗糙度的影响

许多著作讨论过直圆柱导体(直导线)的高频趋肤效应;这种效应在 0.1 兆赫时已很显著,导线中轴的电流密度可达表面的 40%。由于有效承载的横截面减小,电阻将增大。这时我们还未考虑导线表面是否光滑的问题。

表面粗糙度带来的问题是表面电流路径增长,有效的表面电导率下降。实际上,应把趋肤深度 τ 与表面不平度的均方差 H_{ck} 结合考虑,二者的比值是关键数据。举例如下:

例 1, 黄铜圆截止波导工作在 30 兆赫, $\tau = 22.6$ 微米;波导内表面光洁度甚高, $H_{ck} = 0.5$ 微米;故可算出 $H_{ck}/\tau = 0.022$, 即 $H_{ck} \ll \tau$ 。这种情况表面电流路径加长问题不严重,有效的表面电导率可为 $0.99\sigma_0$ 。

例 2, 黄铜传输波导(矩形或圆形)工作在 10 兆赫,波导内表面光洁度不太高;这时 $H_{ck} \gg \tau$ 。这种情况表面电流路径加长很多,有效的表面电导率可比直流值低百分之几到百分之二十。频率越高,有效的表面电导率减少越多。这方面的理论工作早有 Morgan^[6] 做过。表 1 是第二次世界大战后最早研究微波金属表面问题的一些实验数据^[7]。

表 1

传输波导的材料	直流电导率测量值, $10^7(\text{欧} \cdot \text{米})^{-1}$	K 波段有效的表面电导率, $10^7(\text{欧} \cdot \text{米})^{-1}$	降低率 (%)
铜	4.5—5.5	4—4.65	11.1—15.4
黄铜	1.48—1.57	1.11—1.45	10.8—25
银	4.79	3.33	30.5

四、正常、反常趋肤效应

在文献[1]中,取金属的表面阻抗为 $Z_m = R_m + jX_m$ 。为尊重国际上的习惯,我们改用物理

$Z_s = R_s + jX_s$ (m 是英文 metal 的第 1 个字母, s 是英文 surface 的第 1 个字母), 故有

$$Z_s = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon + \sigma/j\omega}} \cong \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} = \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma}} (1 + j). \quad (6)$$

近似条件是 $\sigma \gg \omega\epsilon$, 即位移电流可以忽略, 这时得

$$R_s = X_s \cong \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma}}. \quad (7)$$

但是, 当 $\sigma \gg \omega\epsilon$ 成立时, 趋肤深度为

$$\tau \cong \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu\sigma f}}, \quad (8)$$

故可得

$$R_s = X_s \cong \frac{1}{\sigma\tau} = \frac{\rho}{\tau}. \quad (9)$$

以上公式原则上适用于平面金属的表面。

正常趋肤效应是指金属在普通温度下对于高频电磁场的响应, 其物理特征是金属内电子平均自由程较小。根据(9)式可知

$$R_s \propto \sqrt{\rho}, \quad (10)$$

即表面电阻与电阻率的开方成正比。这是正常趋肤效应的特征公式。

当金属温度(绝对温度 T)下降, 减小了晶格内热振动影响, 电子平均自由程加大, 故 ρ 减小, σ 增大。例如, T 由 300K 降到 10K, ρ 减小数千倍, R_s 降低数十倍。

然而, 反常趋肤效应将阻止获得很低的 R_s 。这种效应是当电子平均自由程 l 可与趋肤深度 τ 相比时发生, 对一般金属约在 10K 温度下出现。 τ 被称为“正常趋肤深度”。当 $l \gg \tau$, 电子的运动有部分时间不在 τ 之内, 参与导电的有效电子数减少, 使 R_s 下降的趋势变慢, 终于达到恒定。结果, 超纯金属即使在很低的温度下, R_s 也不会很低。例如, 铜在 3 兆赫时的情况是, 当温度由 300K 降为 4.2K, 表面电导率只增大 6 倍^[8]。因此, 对于高级应用, 必须改用超导材料。

五、解决射频时电导率测量问题的途径

现在我们回过头来谈在几十兆赫情况下确

定金属电导率的问题, Weinschel 和 Sorger 建议过用双同轴线直接测量趋肤深度 τ 的方法^[9], 似未实行. Yell 曾用把黄铜圆截止波导改成半波长谐振腔的办法, 通过测量 Q 值推出黄铜在射频时的电导率, 取得了 365 兆赫时的数据^[10]. 但这办法不能下延到 30 兆赫, 因为半波长是 5 米, 同轴腔的体积大得不可思议.

由(8),(9)式, 可推出另一个表达式:

$$R_s = \frac{\mu\omega\tau}{2}. \quad (11)$$

可见, 在 μ, ω 一定时, 测出 R_s 就等于测出 τ .

本文作者建议用消失模谐振腔测量 R_s ^[11]. 这种腔如以圆波导工作在 H_{11} 模式, 对等效电感配集总电容后可获得谐振腔, 体积很小. 这样就有可能在 30 兆赫时直接测得趋肤深度数据, 从而得到射频时的金属电导率.

六、微波元件中的三种表面

微波元件内表面的基体金属上先是有有一个性质有改变的加工变层, 然后是氧化层(几十埃至几百埃厚), 最后是空气分子、水汽分子的吸附层, 以及尘埃层.

对付氧化层的办法有几种: (1) 计算修正, 如 Brown 的工作^[12]. 他认为对于精度达 1×10^{-1} 的截止波导, 氧化层的影响不可忽略. (2) 镀保护层, 如 Allred 和 Cook 的工作^[3]. 他们在精密黄铜截止波导内表面镀铱 0.13—0.26 微米. (3) 抽真空. 由于 Matyos 的见解^[13], 铜在空气下放置时, 在一定时间内氧化层厚度与时

间的开方成正比, 这就更易于理解抽真空措施的必要性. 如 Stein 的工作, E_{010} 模铱腔是在 10^{-9} 托气压下密封的^[14].

因此, 室温下使用的一般微波元件的内表面的质量是低等的; 计量部门建立的室温使用的无线电标准的内表面质量也只是中等的. 高等的表面必须是加工光洁度高、十分清洁、能在超高真空下工作, 这样的表面常常要在超低温下工作; 它存在于一些高级制品中.

无疑, 对表面的要求与选定的工作频率有关. 如果工作频率低, 就可降低要求.

北京工业大学白同云同志曾启发和帮助作者, 谨此致谢!

参 考 文 献

- [1] 黄志洵, 物理, 8(1979), 461.
- [2] C. K. White, Experimental Techniques in Low-temperature Physics, 1959.
- [3] C. M. Allred and C. C. Cook, *Trans. IRE*, 1-9-2 (1960), 268.
- [4] R. T. Adair, NBSIR, 1976, 76-833.
- [5] D. M. Cook, The Theory of the Electromagnetic Field, (1975).
- [6] S. P. Morgan, *J. Appl. Phys.*, 20(1949), 352.
- [7] E. Maxwell, *J. Appl. Phys.*, 20(1949), 352.
- [8] F. Biquard and A. Septier, *Nucl. Instr. Meth.*, 44(1966), 18.
- [9] B. O. Weinschel and G. U. Sorger, *Acta IMEKO*, (1964).
- [10] R. W. Yell, *IEEE Trans.*, IM-23(1974), 371.
- [11] R. V. Snyder, *Trans. IEEE*, MTT-25(1977), 1013.
- [12] J. Brown, *P. I. E. E.*, Pt. III, 93(1949), 491.
- [13] M. Matyos, *Czech. J. Phys.*, 4-2(1954), 174.
- [14] S. R. Stein, HEPL 741, Stanford University. 1974. 1—102.