

金属光导管传输亚毫米波辐射的研究

傅 恩 生

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

推导了金属光导管传输亚毫米波辐射的透过率表达式: $T = \exp[-\sqrt{\nu/\sigma}(L/d)]$ 。将理论计算值与已发表的测量数据以及我们的测量数据进行了比较, 证明我们的结果比以前的理论计算值更接近实验测量值。

在亚毫米波区, 目前还缺乏实用的波导元件, 在很多情况下, 如较长距离的亚毫米波传输; 需要亚毫米波的低温物理实验等, 还经常使用金属光导管。金属光导管传输亚毫米波的理论实验已有人做过研究^[1,2], 但理论计算的结果与实验测量数值有明显的不一致。我们重新推导了光导管透过率表达式, 分析了公式的物理意义, 并将计算结果与已发表过的测量数据以及我们的测量数据进行了比较, 证明我们的结果比以前的理论计算值更接近实验测量值。

一、金属光导管的透过率

设金属的复数折射率 $\hat{n} = n(1 + iK)$, n 和 K 都是实数, K 为衰减指数, 则 TE 波的反射率^[3]

$$R_{\perp} = \left(\frac{\cos \alpha_i - \hat{n} \cos \alpha_t}{\cos \alpha_i + \hat{n} \cos \alpha_t} \right)^2, \quad (1)$$

其中 α_i 是入射角。这时折射定律可表示为

$$\sin \alpha_t = \frac{1}{\hat{n}} \sin \alpha_i, \quad (2)$$

这里 α_t 是复数, 并且不再具有折射角的简单意义。令

$$\hat{n} \cos \alpha_t = p + iq, \quad (3)$$

则

$$R_{\perp} = \frac{(\cos \alpha_i - p)^2 + q^2}{(\cos \alpha_i + p)^2 + q^2}. \quad (4)$$

其中

$$p^2 = \frac{1}{2} \{ \sqrt{[n^2(1-K^2) - \sin^2 \alpha_i]^2 + 4n^4 K^2} + [n^2(1-K^2) - \sin^2 \alpha_i] \}, \quad (5)$$

$$q^2 = \frac{1}{2} \{ \sqrt{[n^2(1-K^2) - \sin^2 \alpha_i]^2 + 4n^4 K^2} - [n^2(1-K^2) - \sin^2 \alpha_i] \}, \quad (6)$$

用金属的介电常数 ϵ 、导磁率 μ 和电导率 σ 表示金属的光学常数, 得

收稿日期: 1984年1月5日; 收到修改稿日期: 1984年7月30日

$$n^2(1-K^2) = \mu\epsilon, \quad (7)$$

$$n^2K = \mu\sigma/\nu. \quad (8)$$

其中 ν 是入射波的频率。将(7)、(8)式代到(5)、(6)式, 得到

$$p^2 = \frac{1}{2} \left[\sqrt{(\mu\epsilon-1)^2 + 4\left(\frac{\mu\sigma}{\nu}\right)^2} + (\mu\epsilon-1) \right], \quad (9)$$

$$q^2 = \frac{1}{2} \left[\sqrt{(\mu\epsilon-1)^2 + \left(\frac{\mu\sigma}{\nu}\right)^2} - (\mu\epsilon-1) \right]. \quad (10)$$

通常金属的电导率 $\sigma \sim 10^{17} \text{ sec}^{-1}$, 亚毫米波的频率 $\nu \sim 10^{13} \text{ Hz}$, 而 μ 和 ϵ 都是小于 10^3 的数, 因此, (9)、(10)式可以简化成

$$p^2 \doteq q^2 \doteq \sigma/\nu$$

或

$$p = \sqrt{\frac{\sigma}{\nu}}. \quad (11)$$

我们用掠射角 φ 代替入射角 α_i , 且 $\varphi = \frac{\pi}{2} - \alpha_i$, 又考虑到 φ 角通常小于 0.3 rad , 可以用 $\sin \varphi \doteq \varphi$ 的近似表示, 将(11)式代入到(4)式得

$$R_{\perp} = \frac{2p^2 - 2p\varphi + \varphi^2}{2p^2 + 2p\varphi + \varphi^2} \doteq \exp\left(-2\sqrt{\frac{\nu}{\sigma}}\varphi\right). \quad (12)$$

对于 TM 波, 电矢量平行于入射面, 其反射率

$$\begin{aligned} R_{\parallel} &= \left(\frac{\hat{n} \cos \alpha_i - \cos \alpha_t}{\hat{n} \cos \alpha_i + \cos \alpha_t} \right)^2 = \frac{[n^2(1-K^2)\cos \alpha_i - p]^2 + [2n^2K \cos \alpha_i - q]^2}{[n^2(1-K^2)\cos \alpha_i + p]^2 + [2n^2K \cos \alpha_i + q]^2} \\ &\doteq \frac{2p^2\varphi^2 - 2p\varphi + 1}{2p^2\varphi^2 + 2p\varphi + 1} \doteq \exp\left(-2\sqrt{\frac{\nu}{\sigma}}\varphi\right). \end{aligned} \quad (13)$$

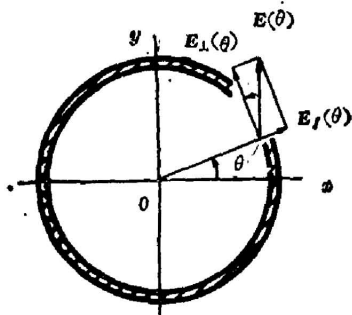


图1 在方位角 θ 入射波的电矢量分解情况

Fig. 1 When azimuth of incident radiation is θ , the electrical vector is analysed

现在考虑入射波方位角 θ 的影响。光导管端面坐标如图1所示。假设入射波沿 y 方向线偏振。当入射面与 xz 平面成 θ 角时, 则电矢量 $\mathbf{E}(\theta)$ 可以分解成 $\mathbf{E}_{\perp}(\theta)$ 和 $\mathbf{E}_{\parallel}(\theta)$ 两个分量, 相应的反射率

$$r_{\perp}(\theta) = \left[\exp\left(-2\sqrt{\frac{\nu}{\sigma}}\varphi\right) \right] \cos^2 \theta, \quad (14)$$

$$r_{\parallel}(\theta) = \left[\exp\left(-2\sqrt{\frac{\nu}{\sigma}}\varphi\right) \right] \sin^2 \theta. \quad (15)$$

由于对称性, 我们仅考虑 θ 角由 0 到 $\pi/2$ 范围内的平均反射率 \bar{R} 的计算,

$$\begin{aligned} \bar{R} &= \int_0^{\pi/2} \frac{(r_{\perp} + r_{\parallel}) d\theta}{\pi/2} \\ &= \frac{1}{2} \left[\exp\left(-2\sqrt{\frac{\nu}{\sigma}}\varphi\right) + \exp\left(-2\sqrt{\frac{\nu}{\sigma}}\varphi\right) \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

这一结果, 对沿 x 方向的线偏振以及自然光均正确。

设入射波在光导管内径 m 次反射, 则

$$m \doteq L\varphi/d, \quad (17)$$

其中 L 和 d 分别为光引管的长度和直径。入射波在光导管内的反射情况如图2所示。这时有

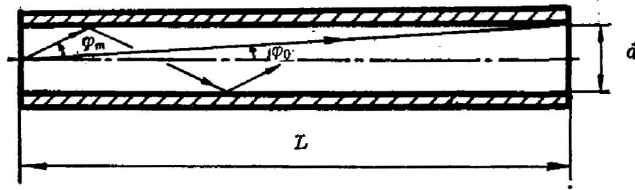


图 2 辐射通过光导管的有关参数

Fig. 2 The concern parameters are shown when the radiation passes through the light pipe

$$\bar{R}^m = \frac{1}{2^m} \left[\exp\left(-2\sqrt{\frac{\nu}{\sigma}} \varphi\right) + \exp\left(-2\sqrt{\frac{\nu}{\sigma}} / \varphi\right) \right]^m \quad (18)$$

如果考虑立体角 \$\Omega_0\$ 到 \$\Omega_m\$ 内光导管透过率 \$T\$, 则有

$$T = \left[\int_{\Omega_0}^{\Omega_m} \bar{R}^m d\Omega / \int_{\Omega_0}^{\Omega_m} d\Omega \right] + T_{00} \quad (19)$$

其中 \$\Omega_0 \doteq 4\pi\varphi_0^2\$, \$\Omega_m \doteq 4\pi\varphi_m^2\$, \$T_{00}\$ 为未经反射而直接通过管子的辐射所占的百分率。将(17)、(18)式代入(19)式, 得

$$T \doteq \frac{1}{\varphi_m^2} \int_{\varphi_0}^{\varphi_m} \frac{\exp\left(-2\sqrt{\frac{\nu}{\sigma}} \frac{L\varphi^2}{d}\right)}{2^{L\varphi/d}} \left[1 + \exp\left(-2\sqrt{\frac{\nu}{\sigma}} \left[\frac{1}{\varphi} - \varphi\right]^{L\varphi/d} d\varphi^2 \right) \right] + T_{00}$$

因 \$\varphi_0\$ 至 \$\varphi_m\$ 是很小的区间, 用中值定理可得

$$T \doteq \frac{\exp\left(-\sqrt{\frac{\nu}{\sigma}} \frac{L\varphi_m^2}{2d}\right)}{2^{L\varphi_m/2d}} \left[1 + \exp\left(-4\sqrt{\frac{\nu}{\sigma}} \frac{1}{\varphi_m}\right) \right]^{L\varphi_m/2d} + T_{00} \quad (20)$$

通常 \$\exp\left(-\sqrt{\frac{\nu}{\sigma}} \frac{L}{2d} \varphi_m^2\right) \sim 1\$, \$\exp\left(-4\sqrt{\frac{\nu}{\sigma}} / \varphi_m\right) < 1\$, \$T_{00} \sim 0\$, 于是(20)式可以化简为

$$\begin{aligned} T &\doteq \frac{1}{2^{L\varphi_m/2d}} \left\{ 1 + \left[1 - 4\sqrt{\frac{\nu}{\sigma}} \frac{1}{\varphi_m} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1}{2} \left(4\sqrt{\frac{\nu}{\sigma}} \frac{1}{\varphi_m} \right)^2 \right]^{L\varphi_m/2d} \right\} \\ &\doteq \left\{ 1 - 2\sqrt{\frac{\nu}{\sigma}} \frac{1}{\varphi_m} \right. \\ &\quad \left. + 4 \left(\sqrt{\frac{\nu}{\sigma}} \frac{1}{\varphi_m} \right)^2 \right\}^{L\varphi_m/2d} \\ &\doteq \exp\left(-\sqrt{\frac{\nu}{\sigma}} \frac{L}{d}\right), \quad (21) \end{aligned}$$

这就是我们得到的金属光导管透过率表达式。公式表明: (1) 光导管透过率与入射角度无关(不含有 \$\varphi\$); (2) 长波辐射比短波辐射透过率高; (3) 高电导率材料的光导管透过率高; (4) 随着光导管纵横比 \$L/d\$ 增加, 透过率呈指数式衰减。

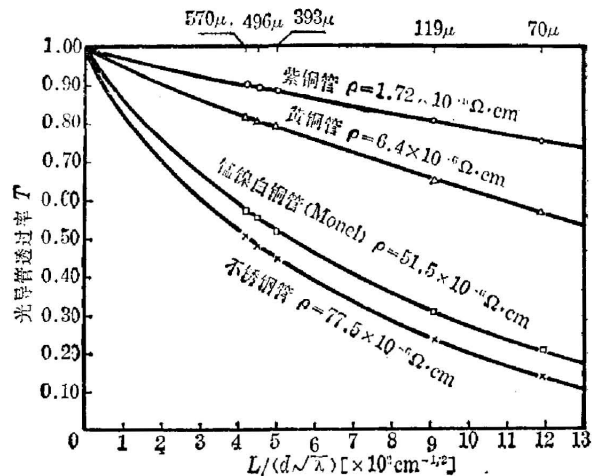


图 3 不同材料的光导管的透过率与参数 \$L/(d\sqrt{\lambda})\$ 的关系

Fig. 3 The transmissivities of light pipes that are made of different material depend on parameter \$L/(d\sqrt{\lambda})\$

对四种材料的光导管,其透过率与参量 $L/(d\sqrt{\lambda})$ 的关系示于图 3。在图中标出了光泵分子激光器的主要谱线相应的坐标,其中包括甲基氟 (CH_3F) 的 $496\mu\text{m}$, 甲醇 (CH_3OH) 的 $70\mu\text{m}$, $119\mu\text{m}$ 和 $570\mu\text{m}$ 以及甲酸 (HCOOH) 的 $393\mu\text{m}$ 。

二、光导管透过率的测量

我们用光泵亚毫米波激光器做辐射源,测量了黄铜光导管的透过率。有关光泵亚毫米波激光器的描述请参阅 [4, 5]。只是在光导管的位置放置了 A、B 两只光导管,黄铜光导管的内壁用海军呢布条沾研磨膏(绿碳化硅与硬脂酸、石蜡、凡士林、油酸的混合物)抛光,反复摩擦数十次,然后用石油醚清洗,热风吹干。用 He-Ne 激光 (6328\AA) 照射光导管,在出口处有清晰的光斑。以白炽灯照明白纸做漫反射体,将光导管对准白纸,用肉眼观察光导管内壁,没有因抛光不良出现的条纹和黑斑。光导管内壁光亮如镜。将光导管 A 的端面直接对准激光器输出窗口(直径 3mm),管端面与窗口距离约 1mm。光导管 A 是内径 3.8mm,长 6.5cm 的黄铜管,用它做前级引出波导。光导管 B 是内径 6mm,长 110.0cm 的黄铜管。将 B 管与 A 管对接,间隙约 1mm。在激光器输出稳定的情况下(起伏~5%),首先在 A 管的末端用热释电接收器测量输出功率为 I_a ,然后放好 B 管,在 B 管的末端测出激光功率为 I_b ,则光导管 B 的透过率

$$T = \frac{I_b d_b^2}{I_a d_a^2},$$

表 1 金属光导管透过率的实验值与理论值

Table 1 The experimental and theoretical values of transmissivity of metal Light pipe

No.	材 料	尺 寸		电阻率(电导率)	波 长	光导管的透过率, T			注
		内 径	长 度			实验值	本文计算值	[1]中计算值	
1	黄铜	0.43 in (~1.1 cm)	48 in (~122 cm)	$\rho=6.4\mu\Omega\text{cm}$ ($\sigma=1.4\times 10^{17}\text{sec}^{-1}$)	140 μ	60%	64%	71%	实验值引自 [1]
2	黄铜	0.43 in (~1.1 cm)	36 in (~91 cm)	$\rho=6.4\mu\Omega\text{cm}$ ($\sigma=1.4\times 10^{17}\text{sec}^{-1}$)	140 μ	65%	72%	76%	[1]
3	黄铜	0.43 in (~1.1 cm)	28 in (~70 cm)	$\rho=6.4\mu\Omega\text{cm}$ ($\sigma=1.4\times 10^{17}\text{sec}^{-1}$)	140 μ	75%	78%	80%	[1]
4	黄铜	0.43 in (~1.1 cm)	12 in (~30 cm)	$\rho=6.4\mu\Omega\text{cm}$ ($\sigma=1.4\times 10^{17}\text{sec}^{-1}$)	140 μ	82%	89%	90%	[1]
5	黄铜	1.26 cm	51 cm	$\rho=6.73\mu\Omega\text{cm}$ ($\sigma=1.34\times 10^{17}\text{sec}^{-1}$)	238 μ	T^*	88%	89%	T^* 为参考黄 铜管透过率
6	锰镍白铜 (Monel)	1.23 cm	51 cm	$\rho=51.5\mu\Omega\text{cm}$ ($\sigma=1.74\times 10^{16}\text{sec}^{-1}$)	238 μ	$0.81T^*$	70%	75%	实验值引自 [2]
7	不锈钢 (321 型)	1.22 cm	51 cm	$\rho=77.5\mu\Omega\text{cm}$ ($\sigma=1.16\times 10^{16}\text{sec}^{-1}$)	238 μ	$0.77T^*$	65%	70%	[2]
8	黄铜	0.6 cm	110 cm	$\rho=6.4\mu\Omega\text{cm}$ ($\sigma=1.4\times 10^{17}\text{sec}^{-1}$)	119 μ	(41±5)%	46%	61%	
9	黄铜	0.6 cm	110 cm	$\rho=6.4\mu\Omega\text{cm}$ ($\sigma=1.4\times 10^{17}\text{sec}^{-1}$)	432 μ	(66±5)%	66%	72%	

其中 d_b 是光导管 B 的内径, d_a 是光导管 A 的内径。

我们将文献中报道过的各种材料的光导管的透过率和我们的测量结果一并引入表 1 中, 同时将按 (21) 式计算的值和按文献 [1] 给出的公式的计算值也列于表 1 中。可见我们的结果比以前的理论结果更符合实验。表 1 中最后二行是我们的实验结果, 其中 $119 \mu\text{m}$ 是光泵甲醇亚毫米波激光^[4], $432 \mu\text{m}$ 是光泵甲酸亚毫米波激光^[5], 实验误差主要来源是激光器输出功率的起伏 ($\sim \pm 5\%$)。

三、讨 论

早期报道的光导管透过率公式为^{*[1]}

$$T = \frac{1}{2} \exp(-2q) + \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{2} qF^2\right) \right] / qF^2 \doteq \frac{1}{2} [1 + \exp(-2q)] - qF^2/8. \quad (22)$$

其中 $q = \left(0.183 \frac{L}{d}\right) \sqrt{\frac{\rho}{\lambda}}$, $F = 2\alpha_m$, F 是入射波的 f 数, α_m 是掠射角。我们发现, 该公式不能说明随着光导管长度的增加, 透过率要下降的现象。(22) 式中 $qF^2/8$ 是个可忽略的小量 ($\sim 10^{-4}$ 量级), 虽然 $\exp(-2q)$ 是随 L 增大而指数式衰减, 但是, 即使 L 增长到使 $\exp(-2q) \rightarrow 0$, 仍然有 $T \rightarrow 50\%$ 的透过率, 这是与实验不符的。本文中公式 (21) 能充分反映透过率与光导管长度、直径和波长的关系。(21) 式表明, 光导管透过率与辐射的入射角度无关。这是因为辐射在光导管内传输主要损失电矢量的平行分量, 按 (13) 式, 平行分量的传输随掠射角的增大而增加, 但掠射角增大导致反射次数增加 (见 (17) 式), 从而使传输减小。这样, 掠射角从正反两个方面起作用, 其结果是相互抵销, 因而得到光导管透过率与辐射入射角度无关的结论。

感谢王之江教授对本项工作的指导。王忠志 和石培昇同志参加了光导管透过率测量, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] R. C. Ohlmann, P. L. Richards and M. Tinkham; *J. Opt. Soc. Amer.*, 1958, **48**, No. 8 (Aug.), 531.
- [2] R. E. Harris, R. L. Cappelletti and D. M. Ginsberg; *Appl. Opt.*, 1966, **5**, No. 6 (Jun), 1083.
- [3] M. Born and E. Wolf; *Principles of Optics*, Chap. XIII, (Pergamon Press, 1964).
- [4] 傅恩生, 王忠志, 石培昇; 《光学学报》, 1982, **2**, No. 1, (Jan), 9.
- [5] 傅恩生, 王忠志, 石培昇; 《光学学报》, 1983, **3** No. 7 (Oct), 603.
- [6] F. K. Kneubühl and E. Affolter; *Infrared and Millimeter Waves*, (Academic Press, New York, 1959), **1**, 235.

* 在文献 [1, 2, 6] 中, 该式都写成

$$T = \frac{1}{2} e^{-2q} + (1 - e^{-q/2F^2}) F^2/q \doteq \frac{1}{2} (1 + e^{-2q}) - q/3F^2.$$

但是, 正确的表达式是 (22) 式。

Transmission of submillimeter waves in a metal light pipe

FU ENSHENG

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 5 January 1984; revised 30 July 1984)

Abstract

The transmissivity expression $T = \exp[-\sqrt{\nu/\sigma}(L/d)]$ for submillimeter waves transmitted in a metal light pipe is given. Comparison of the theoretical calculation with the measured data by the author and data published elsewhere has been made. It is shown that the author's results are more close to the experimental values than the theoretical calculated values before.