

亚毫米波法布里-珀罗干涉仪的研制

林贻堃 丘秉生 郑兴世
(无线电电子学系)

摘 要

作者采用光刻技术制成的金属栅网作为反射器构成的法布里——珀罗干涉仪,可用于100微米至1000微米波长范围的亚毫米波作波长测量.干涉仪的Q值的实验测量结果与理论计算值在同一数量级内.以波长为336.6微米的HCN激光器的输出谱线作参考,波长测量的精度优于0.1%.

利用金属栅网作为反射器构成的法布里——珀罗干涉仪,已广泛应用于远红外和亚毫米波段,可用它测量波长,也可以用来测量远红外和亚毫米波激光的谱线宽度,或者作为窄带通、带阻、低通和高通滤波器,应用在各种设备和器件中.六十年代以来,国外有关这方面的理论及技术有了发展并逐渐趋于成熟^{[1]~[4]}.为了测量亚毫米波波长及制作光泵亚毫米波激光器的部件,我们用光刻工艺在石英薄片或聚酯薄膜上制作了电感性的铝栅网,并装配成法布里——珀罗干涉仪,在实验室中使用.下面就法—珀干涉仪的原理及测试结果分述如下:

一、法布里—珀罗干涉仪的工作原理

法—珀干涉仪是由两块相距为 d ,互相平行的金属栅网组成.每块栅网可看作是一反射器,其反射系数为 $r = \rho e^{i\theta}$,传输系数为 t .设垂直入射到干涉仪的场强振幅为 E_0 ,相位常数 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$,如图一所示,通过栅网被检测到的亚毫米波场强 E 为:

$$E = E_0 t^2 e^{-jkd} [1 + r^2 e^{-j^2kd} + r^4 e^{-j^4kd} + \dots] \\ \simeq \frac{E_0 t^2 e^{-jkd}}{1 - r^2 e^{-j^2kd}} \quad (1)$$

其中级数的项数 $n \rightarrow \infty$, $r < 1$.

1. 干涉仪的输出功率

干涉仪的输入功率 $P_0 \propto E_0^2$,输出功率 $P \propto |E|^2$

$$P = \frac{P_0 t^4}{1 + \rho^4 - 2\rho^2 \cos^2(2kd - \theta)} \quad (2)$$

令：反射器的功率反射系数 $R = \rho^2$ ，功率传输系数 $T = t^2$ ，则

$$T = 1 - R - A$$

其中 A 为栅网的吸收系数。

由(2)式可得

$$P = P_0 \left[1 - \left(\frac{A}{1-R} \right)^2 \right] \cdot \left[1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \left(\frac{\delta}{2} \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

其中 $\frac{\delta}{2} = \frac{2kd - \theta}{2} = \frac{2\pi}{\lambda} d - \frac{\theta}{2}$ (4)

当 $\frac{\delta}{2} = n\pi$ (n 为正整数) 输出功率 P 极大，即

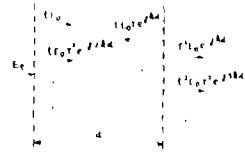
$$P_{\max} = P_0 \left[1 - \left(\frac{A}{1-R} \right)^2 \right]$$

如果栅网是理想的，即 $A = 0$ ，这时输出功率等于输入功率，令干涉仪的功率传输系数

$\tau = \frac{P}{P_0}$ ，则有 $\tau = \frac{P}{P_0} = 1$ 。

当 $\frac{\delta}{2} = (n + \frac{1}{2})\pi$ 时，输出功率 P 为极小值，即

$$P_{\min} = \frac{P_0 \left[1 - \left(\frac{A}{1-R} \right)^2 \right]}{1 + \left(\frac{4R}{1-R} \right)^2}$$



图一、对称反射器干涉图

对于栅网，参数 T 、 R 、 Q 及 A 均与工作波长有关。

2. 干涉仪的Q值

当两栅网的间距 d 固定，信号源波长改变时，外品质因数 Q_e 的值为：

$$Q_e = \frac{\lambda}{2\Delta\lambda}$$

当 λ 值偏离 $\Delta\lambda$ 时，输出功率减少为极大值的一半，相应地 $\frac{\delta}{2} \rightarrow \frac{\delta}{2} + \Delta \frac{\delta}{2}$ ，并且 $\frac{\delta}{2} = n\pi$ ，由(3)式得：

$$\frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \left(\frac{\delta}{2} + \Delta \frac{\delta}{2} \right) = 1$$

即： $\sin^2 \left(\Delta \frac{\delta}{2} \right) = \frac{(1-R)^2}{4R}$

因为 $\Delta \frac{\delta}{2}$ 是很小的，所以 $\Delta \frac{\delta}{2} \approx \frac{1-R}{2\sqrt{R}}$ 。

但是 $\frac{\delta}{2} = \frac{2\pi}{\lambda} d - \frac{\theta}{2}$ ，两边求微商得：

$$\Delta \frac{\delta}{2} = - \frac{2\pi}{\lambda^2} d \Delta\lambda,$$

$$\therefore Q_e = \frac{\lambda}{2\Delta\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} d \frac{\sqrt{R}}{1-R} \quad (5)$$

可见 Q_e 是和功率反射系数 R 成比例的,且和距离 d 成比例。

若 λ 不变,而改变两栅网间距离 d ,则

$$\Delta \frac{\delta}{2} = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta d = \frac{1-R}{2\sqrt{R}}$$

可见

$$Q_e = \frac{\lambda}{2\Delta\lambda} = \frac{d}{2\Delta d} = \frac{2\pi}{\lambda} d \frac{\sqrt{R}}{1-R} \quad (6)$$

如果用通用的所谓“精细度” F_R 表示,则 Q_e 与 F_R 之间有如下关系:

$$Q_e = qF_R$$

其中 $q = \frac{2d}{\lambda}$ 为两栅网之间的驻波节点数目。

则

$$F_R = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$$

由此可见,法一珀干涉仪的 Q_e 值测量,既可通过固定 d 改变 λ 来测定,也可以固定 λ 而通过测量半功率点距离 Δd 来确定。或者通过反射系数 R 的测量计算得出。

3. 感性栅网的功率传输系数 T

如图二(a)所示的感性栅网,不论是用铜线或镍线编织而成的园形线栅网或是用光刻工艺制得的薄带线栅网,均可作为反射器。设栅网常数为 g ,金属线半径为 a ,当 $\lambda \gg g$,且 $g \gg a$ 时,R.Ulrich等⁽¹⁾给出了传输系数 T 的近似计算公式:

园形线(线径为 $2a$):

$$T = \left(\frac{2g}{\lambda} \ln \frac{g}{2\pi a} \right)^2$$

薄带线(线宽为 $2a$):

$$T = \left(\frac{2g}{\lambda} \ln \sin \frac{\pi a}{g} \right)^2$$

(7)

如果金属栅网表面有介质时,若介质的折射率为 n ,这时传输系数 T 将按下式给予修正:

$$\frac{T'}{T} = \frac{1-R'}{1-R} = \frac{n}{R+(n+1)^2} \frac{T}{4} \quad (8)$$

由(8)式可见,由于介质片的存在,使传输系数增加($n > 1$), Q 值将随之减少。

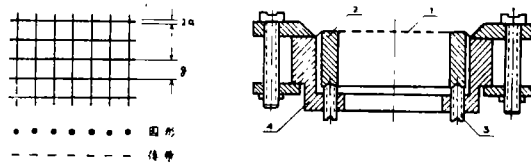
(5)式(7)式及(8)式可作为栅网设计的参考。

当 $g < \lambda$,更精确的计算可参考B.D.Saksena⁽⁴⁾给出的比较繁复的计算公式。

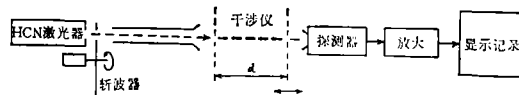
二、实验部分

我们采用光刻技术制备薄带金属栅网:选用0.1毫米厚的聚酯薄膜作为基片,先在

基片上真空蒸镀纯铝，然后用光刻腐蚀工艺制得如图二(a)所示的电感性栅网，光栅参数见表1。将栅网安装在专用的夹具上，夹具的结构如图二(b)所示，在园环(2)和框架(4)之间留有一点空隙，通过调节三颗按品字形排列的螺钉(3)，使园环(2)略为凸起而把栅网绷紧成镜面。将两只装有栅网膜片的夹具分别固定在两个可以调节相互之间距离的平行平面上，便构成一具可调谐的亚毫米波法布里—珀罗干涉仪。两栅网之间的距离可以手动调节，也可以用电钟马达带动作连续扫描，以便自动记录，栅网之间的距离的改变量可用千分表读出。



图二、栅网及夹具



图三、测试实验装置原理

亚毫米波法—珀干涉仪性能的测试，可以利用远红外谱仪进行，也可以用固定波长的亚毫米波激光器作光源，通过连续改变栅网距离 d ，记录干涉仪输出的谐振曲线从而测出波长；并测量“半功率点”间的距离 $2\Delta d$ ，以确定干涉仪的 Q_e 值。实验装置如图三所示。

我们用HCN亚毫米波激光器作为实验用光源，也用它辐射的波长 $\lambda = 336.6\mu\text{m}$ 作为参考波长，以校验法—珀干涉仪测量波长的精确度。所用的斩波器频率为12.5赫芝。用热释电探测器探测得的讯号经过低噪声前置放大器及选频放大器放大后用电表显示及用记录仪描线。

用读取极大值之间的距离确定半波长，并取50次干涉极大值之间的距离进行计算，以HCN激光器波长为 $336.6\mu\text{m}$ 的谱线作为比对，测量波长的误差小于0.1%。

用聚酯薄膜作基片的铝栅网构成的法布里—珀罗干涉仪的 Q 值实验测量结果及理论计算结果，如表一所示。

表一 在波长为336.6微米时干涉仪的特性

栅网参数				半功率点 宽度 $2\Delta d$ (mm)	Q_e 值		FR 值	
光栅常数 g (mm)	线宽度 $2a$ (mm)	面积 (mm) ²	间距 (mm)		实验	计算	实验	计算
0.12	0.04	20 × 20	25.5	0.032	800	1220	5.3	8.0
0.06	0.02	30 × 30	38.5	0.018	2100	7750	9.4	33.9

由此可见光栅常数较小的光栅构成的干涉仪 Q_e 值及 F_R 值都较高，更利于作波长的测量。但是，其实验值与计算值的偏离较大些。如果考虑到金属镀层较薄以及金属和介质的吸收损耗，以及两栅网不平行度引起的损耗等等的影响，可以说理论和实验结果基本上是相符合的。

我们也用石英基片制作了栅网, 由于石英的折射系数(n)较大, 介质吸收也大, 因而测得的 Q 值比聚酯薄膜基片的低一半左右。

电感性栅网具有短波透过, 长波反射的特性, 当波长 λ 增加时, R 将随之增大, Q_e 也增大, 因此, 用上述给出的参数制作的法布里—珀罗干涉仪, 估计可用于 $100\text{--}1000\mu\text{m}$ 波长范围内的测量。

参 考 资 料

- [1] R. Ulrich et al., *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, MTT-11 (1963), 5, 363.
- [2] R. Ulrich, *Applied Optics*, 8 (1969) 2, 319.
- [3] J. C. Lecullier and G. Chanin, *Infrared Physics*, 16, (1976) 1-2, 273.
- [4] B. D. Saksena et al., *Infrared Physics*, 9 (1969), 2, 43.

Investigation of SMM Wave Fabry—Perot Interferometer

Lin Yikun Qiu Bingsheng Zheng Xingshi

A Fabry-Perot interferometer has been constructed for the measurement of submillimeter wavelength in the region of $100\mu\text{m}\text{--}1000\mu\text{m}$. The measured Q value of interferometer is same order of magnitude as calculated value. The accuracy of wavelength measurement of this interferometer is better than 0.1% with the wavelength of stronger line $336.6\mu\text{m}$ of HCN laser as the reference spectral line.