

基于法布里 - 珀罗干涉仪的太赫兹波长测试仪

曹铁岭^{1,2} 姚建铨^{1,2}

(¹郑州大学河南省激光与光电信息技术重点实验室 郑州 450052)

(²天津大学精仪学院激光与光电子研究所 天津 300072)

Email: caotlingfirst@163.com

摘要 太赫兹波波长的测量在其科研和实际应用中显得日益迫切和重要。介绍了用金属网栅 Fabry - Perot (F - P) 干涉仪测量太赫兹波波长的原理, 阐述了金属网栅的参数设计和波长测量过程, 并依此原理推出了计算太赫兹波线宽的公式。

关键词 F - P 干涉仪; 金属网栅; 太赫兹波; 波长测量

中图分类号 O434.3, O436.1

The Wavelength Testing Instrument of Terahertz Wave Based on Fabry - Perot Interferometer

Cao Tieling^{1,2}, Yao Jianquan^{1,2}

(¹Henan Key Laboratory of Laser and Opto - electric Information Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou, 450002, China)

(²Institute of Laser and Opto - electronics, Tianjin University, Tianjin, 300072, China)

Abstract The measurement of terahertz wavelength is more and more urgent and important in the science research and practical application. The fundamental of measuring terahertz wavelength is introduced. The parameter of metal mesh is designed and the process of measuring wavelength is narrated, and the formula of calculating the terahertz wave line width is obtained.

Key words F - P interferometer; metal grids; terahertz wave; wavelength measurement

1 引言

太赫兹波是指光波频率在 0.1 - 10T 的范围内 (真空中的相应波长为 3000 - 30 μ m), 它是位于红外线和微波之间的一个波段, 通常也叫 THz 波。目前用于远红外波段的光谱仪或单色仪不能满足太赫兹波段波长测量的需要, 而用于 THz 波波段的光谱仪不仅价格极其昂贵, 而且覆盖波长范围较窄, 也不能满足科研和实际需要。本文介绍了一种结构简单, 操作方便, 实用性强的测量 THz 波波长的方法。

2 金属网栅 F - P 干涉仪的结构原理

在抛光的、对 THz 波段透明的基底上真空镀上一层金属薄膜, 然后经过一系列光刻工序, 即可制成金属网栅, 将两片金属网栅平行放置, 就构成了一个 F - P 干涉仪如图 1 所示。

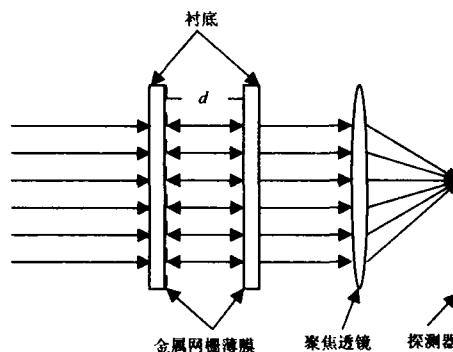


图1 金属网栅 F - P 干涉仪

用 F - P 干涉仪测量激光波长具有结构简单, 调整方便, 精确度高等优点。如图 1 所示, 太赫兹光波垂直于 F - P 腔入射, 当金属网栅对光波的反射率较大时, 光束在两金属网栅之间发生多光束干涉, 干涉光束经过透镜后会聚。对于透射光波, 透射光强与 R 和 δ 的关系是^[1]:

收稿日期: 2007 - 09 - 13

基金项目: 国家自然科学基金 (NFC - 10471071); 高等学校博士学科点专项科研基金 (20040056010)。

作者简介: 曹铁岭 (1979 -), 男, 在读硕士研究生, 主要从事太赫兹波探测方面的研究。

$$I_t = \left(1 - \frac{A}{1-R}\right)^2 \frac{I_0}{1 + \frac{4R\sin^2(\delta/2)}{(1-R)^2}} \quad (1)$$

其中是 I_t 透射光强, I_0 入射光强, R 是网栅光强反射率, A 是网栅吸收率, δ 为光束在两网栅之间往返一次产生的相位差。设两金属网栅之间的距离是 d , 待测的光波长是 λ , 两网栅之间介质的折射率 n , 当满足: $\delta = 2k\pi$ 时, $k = 1, 2, 3, \dots$ 透射光束在会聚点有最大光强: $T^2 I_0 / (1-R)^2$; 当满足: $\delta = (2k+1)\pi$ 时, $k = 1, 2, 3, \dots$ 透射光束在会聚点有最小光强: $T^2 I_0 / (1+R)^2$, 其中 $T = 1 - R - A$; 对于反射率不同的网栅, I_t 和 I_0 的比值

随 δ 的变化曲线如图 2 所示。可以看出, 每当 δ 增加 2π (相应于两网栅之间的间距增加 $\lambda/2n$), 就会出现一次干涉极大值和极小值。故可通过位移平台改变两网栅之间的距离来改变干涉光之间的相位差, 从而改变透射光光强度的大小。每出现一个干涉峰, 网栅的移动距离是 $\lambda/2n$, 通过测量出现干涉峰值的个数和网栅移动的距离, 即可得到所测量光波波长。这就是 F-P 干涉仪测量激光波长的基本原理。从图 2 中可以看出网栅的反射率越大, 干涉条纹越细锐, 透射光强在峰值附近变化也越快, 考虑网栅的吸收时, 干涉峰的峰值会下降。在应用时应根据具体情况选择合适的反射率。

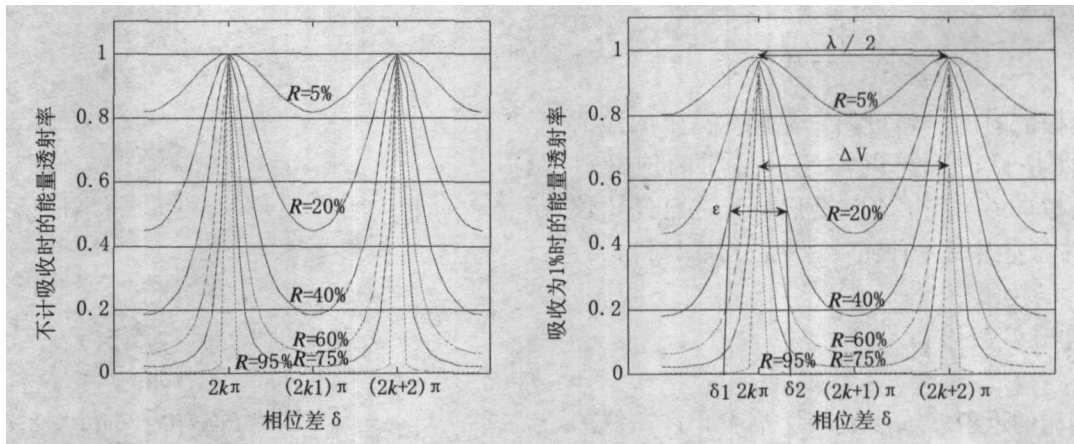


图 2 光强透射率随相位差变化关系曲线

3 金属网栅性质

金属网栅的性质最初是由 Marcuvitz 根据微波传输线理论提出条状网栅的等效电路模型^[2], 后来 Ulrich 等人把它经验地推广到二维金属网格结构^[1], Whitbourn 和 Compton 则给出了有电介质衬底时的电感性和电容性金属网栅的透射率、反射率和吸收率公式^[3]。从成熟的网膜制作工艺考虑, 一般选择电感性金属网栅, 其结构如图 3 所示: 其中 g 是光栅周期常数; $2a$ 是金属线宽, t 是金属膜的厚度。

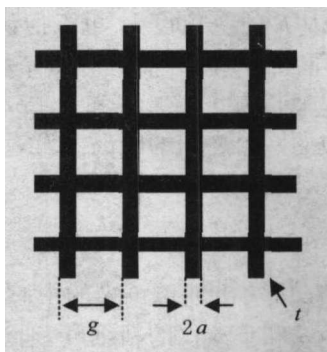


图 3 二维电感性金属网栅

设网栅两侧的电介质折射率分别为 n_1 和 n_2 , 且 n_2

$\geq n_1$, 根据微波传输线理论, 为了使透射光波只具有零级衍射, 网栅周期常数要小于光波波长, 这时, 光波的透射率可近似用等效电路模型来描述, 根据微波传输线理论可得到金属网栅对光波的光强透射率^[3]为:

$$T(n_1, n_2) = \frac{4n_1 n_2 (X/Z_s)^2}{1 + (n_2 + n_1)^2 (X/Z_s)^2} \quad (2)$$

其中 Z_s 是光波在自由空间的阻抗, X 是金属网栅的等效电抗, λ 是光波在自由空间的波长。对于二维电感性网栅:

$$\frac{X}{Z_s} = -\omega_0' \ln \csc \frac{\pi a}{g} \left(\frac{\omega}{\omega_0'} - \frac{\omega_0'}{\omega} \right)^{-1} \quad (3)$$

其中, $\omega_0' = \omega_0 \sqrt{\frac{2}{n_1^2 + n_2^2}}$, ω 是归一化频率等于 g/λ , ω_0 是谐振频率, 约等于 1。当考虑金属网栅的吸收时^[3],

$$T = \frac{4n_1 n_2 [(R_0/Z_s)^2 + (X/Z_s)^2]}{[1 + (n_2 + n_1)R_0/Z_s]^2 + (n_2 + n_1)^2 (X/Z_s)^2} \quad (4)$$

$$R_{12} = \frac{[1 + (n_2 - n_1)R_0/Z_s]^2 + (n_2 - n_1)^2 (X/Z_s)^2}{[1 + (n_2 + n_1)R_0/Z_s]^2 + (n_2 + n_1)^2 (X/Z_s)^2} \quad (5)$$

$$A_{12} = \frac{4n_1 R_0/Z_s}{[1 + (n_2 + n_1)R_0/Z_s]^2 + (n_2 + n_1)^2 (X/Z_s)^2} \quad (6)$$

$$\text{其中, } \frac{R_0}{Z_i} = \frac{\eta}{2} \sqrt{\frac{4\pi\epsilon_0 c}{\lambda\sigma}} \quad (7)$$

T 是光强透射率; R_{12} 是从介质 1 到介质 2 的光强反射率; A_{12} 是从介质 1 到介质 2 的吸收率; R_0 是考虑金属网栅吸收时的等效电阻; X 是金属网栅的等效电抗; 对于电感性网栅 $\eta = g/2a$, c 是真空中光速; ϵ_0 是真空中介电常数; σ 是金属的直流电导率; λ 是光波在真空中的波长。当 $n_1 = n_2 = 1$ 时, 以上公式便描述了薄金属网栅薄膜 ($t \leq 10^{-4}g$) 在真空中的透射性质, 当 t 不可忽略时, Whitebourn^[3] 等总结给出了真空中金属网栅的等效线宽: 当 $t < 2a$, $a < g$, $g < \lambda$ 时, 对于电感性网栅:

$$a_{\text{eff}} = a + \frac{t}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{8\pi a}{t} \right) + 1 \right] \quad (8)$$

金属网栅的衬底材料可用单晶硅。高阻的浮区 (FZ) 本征硅是目前太赫兹波段最透明的绝缘材料^[4]。而且以硅为衬底镀金属薄膜的工艺已经比较成熟, 所以本征硅片是一种比较理想的衬底材料。

4 金属网栅参数设计

金属网栅的反射率大小直接影响着干涉曲线的形状和精细度, 而反射率又由光栅的周期 g , 金属线宽 $2a$, 金属膜的厚度 t , 衬底和两网栅间介质的折射率等因素决定, 所以这些参数设计的是否合理直接影响着实验效果。

4.1 自由光谱范围和精细度

根据多光束干涉的理论和方程(3)透射强度的相位半峰值全宽 $\epsilon = \delta_2 - \delta_1$ (如图 2 所示) 为

$$\epsilon = 4 \arcsin \left(\frac{1-R}{2\sqrt{R}} \right) \quad (9)$$

设频率为 ν_1 的光波第 k 级干涉峰与频率为 ν_2 的光波第 $k+1$ 级干涉峰重合, 可得:

$$\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1 = \frac{c}{\lambda_2} - \frac{c}{\lambda_1} = \frac{c}{\lambda 2nd} \quad (10)$$

$\Delta\nu$ 叫做干涉仪的自由光谱范围, 如图 3 所示。而与 ϵ 所对应的频率宽度 $\delta\nu$ 称为最小可分辨频率间隔:

$$\delta\nu = \frac{\epsilon}{2\pi} \Delta\nu \quad (11)$$

由式(9) - (11) 可得干涉仪的精细度为:

$$F = \frac{\Delta\nu}{\delta\nu} = \frac{2\pi}{\epsilon} = \frac{\pi}{2 \arcsin \left(\frac{1-R}{2R^{1/2}} \right)} \quad (12)$$

干涉仪的精细度 F 随反射率的变化如图 4 所示, 金属网栅的能量反射率一般选为 75% - 90%。

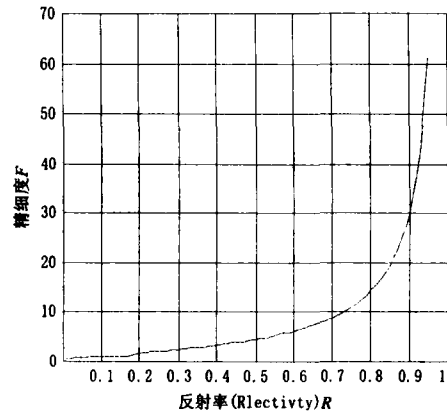


图 4 精细度随反射率的变化关系

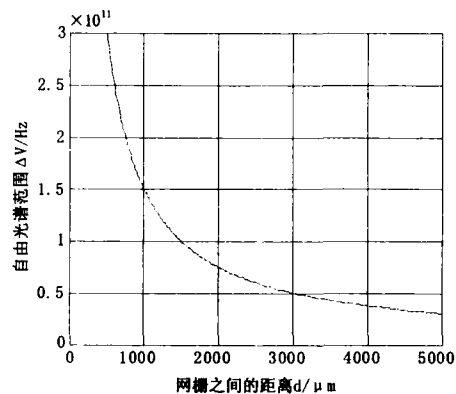


图 5 自由光谱范围随网栅间距离的变化关系

4.2 半峰值位移全宽和光波线宽

从图 2 和方程(1)可知, 对于某单色光, 当 δ 每改变 2π , 即网栅每移动 $\Delta d = \lambda/2n$ 时, 出现一次干涉峰。若网栅移动距离 δd , 使相位差 δ 从 δ_1 变到 δ_2 , 如图 2, 则

$$\delta d = \frac{\epsilon}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2n} = \frac{\lambda}{2nF} \quad (13)$$

我们称干涉峰半峰值高度所对应的网栅移动距离 δd 为半峰值位移全宽。可以看出 δd 是波长 λ 和反射率 R 的函数。对于准单色光, 由于干涉峰展宽, 实际的半峰值全宽会增加。设光波中心波长为 λ , 准单色光的波长范围为 $\lambda - \delta\lambda/2 \sim \lambda + \delta\lambda/2$, 由于 $\delta\lambda$ 很小, 在此范围内 F 的变化很小, 可近似认为不变。当 λ 增大时, 且同一级干涉峰值对应的 d 增大, 如图 6, d_1 和 d_2 分别是波长为 $\lambda - \delta\lambda/2$ 和 $\lambda + \delta\lambda/2$ 的同一级干涉峰值对应的网栅之间的距离。设 $\delta d'$ 为实际的半峰值位移全宽, 则由方程(13)可得:

$$\delta d' = \frac{k\delta\lambda}{2n} + \delta d = \frac{d\delta\lambda}{\lambda} + \frac{\lambda}{2nF} \quad (14)$$

根据方程(14), 由准单色光的中心波长 λ , 两网栅之间的间距 d 和干涉仪的精细度, 通过测量 $\delta d'$, 就可以计算出太赫兹波的频谱宽度 $\delta\nu$ 为:

$$\delta\nu = \left(\frac{\delta d'}{\lambda d} - \frac{1}{2ndF} \right) c \quad (15)$$

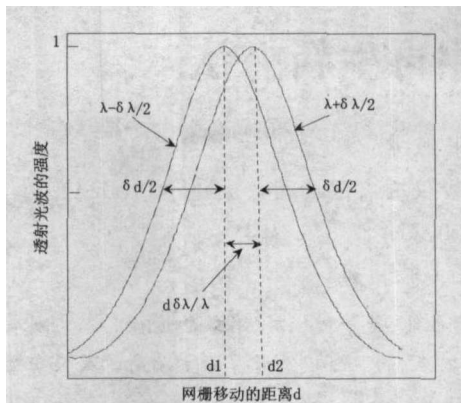


图6 光波非理想单色性对干涉曲线的影响

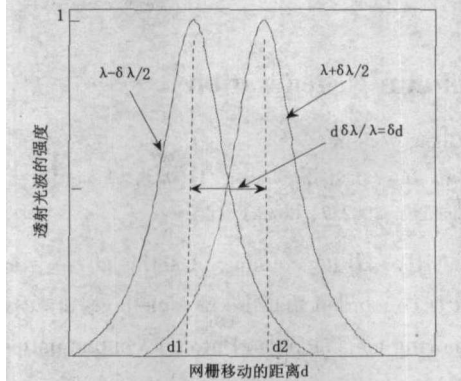


图7 高分辨率导致干涉峰分裂

根据(13),(14)式,由于 $\delta\lambda \neq 0$,所以干涉峰的宽度比理想情况加宽了。

考虑加宽后的干涉仪精细度为:

$$F' = \frac{\lambda}{\delta d'} = \frac{F\lambda^2}{2ndF\delta\lambda + \lambda^2} = \frac{Fc}{2ndF\delta\nu + c} \quad (16)$$

由式(10),(14)和(16)可知,随着网栅间距 d 的增大,干涉仪的自由光谱范围 $\Delta\nu$ 减小,实际的半峰值位移全宽 δd 增大,实际精细度降低。当 $d\delta\lambda/\lambda = \delta d$ 时,如图7所示,波长为 $\lambda - \delta\lambda/2$ 和 $\lambda + \delta\lambda/2$ 的光波可以分开。此时干涉仪的分辨率为

$$RP = \frac{\nu}{\delta\nu} = \frac{\lambda}{|\delta\lambda|} = \frac{\nu}{\Delta\nu} F = kF = \frac{2nd}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{2n\delta d} = \frac{d}{\delta d} \quad (17)$$

其中 $k = 2nd/\lambda$ 是干涉级数。可见当 d 或 k 增大时,干涉仪的分辨率增大,自由光谱范围减小,实际精细度 F' 减小,所以测量波长时应尽量使网栅间距离较小,使干涉仪工作在较小的干涉级次和较小的分辨率上。

4.3 金属网栅的周期和线宽

当金属网栅的周期和线宽变化时,直接影响到网栅的透过率,进而影响干涉仪的精细度和干涉峰的宽度。为了避免边波衍射损耗,对于自由空间中的网栅, g 应该小于 λ ,而对于有衬底情况下的网栅, g 应该小于 λ/n_1 和 λ/n_2 ^[3],其中, λ 为光波在自由空间中的波长。例如,对于用单晶硅做衬底的金属网栅,测量 $92.9\mu\text{m}$ 的光波时,光栅周期应小于 $27\mu\text{m}$ (硅的折射率取3.42)。由于网栅的吸收率很小,此处不予考虑,由现代科学仪器 2008 2

方程(2)(3)可得出当 $n_1 = 1, n_2 = 3.42$ (有硅衬底的情况下)时的金属网栅的能量反射率 R 随 g 的变化如图8。根据图8和图4可以基本估计 g 和 a 的大致取值,然后再考虑光波频谱展宽,金属薄膜的厚度,及金属网栅的非理想平行性等导致的精细度下降等因素,最终选择了金属线宽是7微米,周期20微米,膜厚是50纳米的在本征硅片上镀铜的金属网栅薄膜。

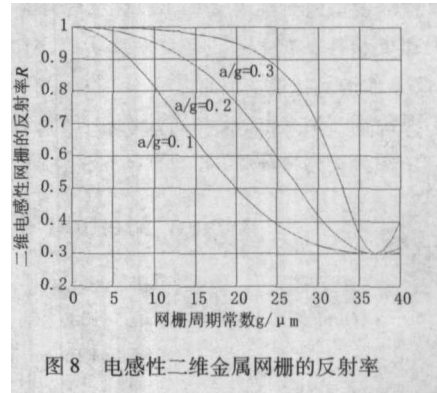


图8 电感性二维金属网栅的反射率

在设计网栅的过程中,一方面要考虑使干涉仪工作在较低的分辨率下,要合理地选择网栅的反射率 R 和精细度 F ,并使干涉仪工作在较低的干涉级数上。另一方面,金属网栅要保证良好的平行性。由于衬底的不平行或者金属薄膜的厚度的不均匀都会使干涉不完善而使干涉峰加宽。由于各种因素引起的金属薄膜与理想平面的绝对偏移量应远小于 $\lambda/(4nF)$ ^[1]。

为了更便捷地进行测量,可使用LabVIEW虚拟仪器平台对步进位移平台进行控制,同时对透射光强进行数据采集与处理,即可直接测出太赫兹波的波长。

5 总结与展望

本文介绍了用低分辨率金属网栅F-P干涉仪测量太赫兹波长原理和方法,通过对网栅参数的分析和计算,设计出了测量 $92.9\mu\text{m}$ 太赫兹波长的金属网栅参数,并得出了计算太赫兹波线宽的计算公式。结合实验的进展构建虚拟仪器平台,便可更为方便、快捷地测量太赫兹波长。

参考文献

- [1] R Ulrich, et al. Tunable Submillimeter Interferometers of the Fabry - Perot Type[J], Microwave Theory and Techniques, 1963, 11(5):363 - 371
- [2] N. Marcuvitz. Waveguide Handbook, Vol. 10, MIT Radiation[M], New York: Mc Graw - Hill Press, 1951, 280 - 285.
- [3] LB. Whitbourn, RC. Compton. Equivalent - circuit formulas for metal grid reflectors at a dielectric boundary[J] Appl. Opt. 1985, 24(2): 217 - 220
- [4] 田艳,王洋,赵国忠. 太赫兹波段硅的光学性质研究[J],现代科学仪器,2006,2