

硅—铝网栅亚毫米波 F-P 干涉仪 及其在激光频谱研究中的应用*

郑兴世 黎耀 林贻莹 陈宝琼

(中山大学电子系, 物理系, 广东, 广州, 510275)

摘要: 在单晶硅薄片上用光刻方法制作了铝金属网栅, 并用在亚毫米波 F-P 干涉仪上. 适宜用作亚毫米波波长的测量和频谱特性的研究.

关键词: 亚毫米波, F-P 干涉仪, 光泵远红外激光.

引言

无衬底的金属网栅或是由“透明的”薄膜(例如聚酯膜)为基片的金属网栅, 常用于远红外干涉滤波器或 F-P 干涉仪^[1]. 对于光栅常数 g 比较小的网栅, 线条十分细密, 用电铸成型法制作无衬底的金属网栅很难, 即使在柔软的聚酯薄膜上采用光刻的方法, 也不容易获得高质量的成品. 我们利用成熟的硅表面光刻工艺技术, 用单晶硅薄片作为金属网栅的基片, 制作了高质量的金属网栅.

1 硅—铝网栅的制备

在 $50\sim 100\ \mu\text{m}$ 亚毫米波短波范围, F-P 干涉仪要使用光栅常数 g 较小的电感性金属网栅. 为使干涉仪有较高的分辨率, 网栅的反射系数 R 要大, 为此, 光栅常数 g 要小于工作波长的 $1/4$ ^[2]. 在波长 $\lambda=50\sim 100\ \mu\text{m}$ 时, $g=12\sim 25\ \mu\text{m}$, 网栅的线宽度 $2a=4\sim 8\ \mu\text{m}$ (选 $2a/g=1/3$ 计算). 这样细密的网栅适合在硬的基片(如石英片或硅片)上制作. 但是石英在中远红外, 特别是 $50\sim 100\ \mu\text{m}$ 波长范围的透过特性不良, 吸收损耗大, 不适宜作基片; 而制作半导体器件的单晶硅薄片是一种很好的红外窗口材料, 它具有宽带平坦的透过特性和反射特性^[3], 适合作金属网栅的基片. 我们测量了厚度为 $0.4\ \text{mm}$ 的硅片在不同波长下的透过率(见表 1), 结果显示透过率的变化是平缓的. 考虑到硅的折射率约为 3.4, 估算硅片表面的反射率接近 30%, 由此可见, 在这些波长范围内硅的吸收损耗是很少的.

本文 1992 年 11 月 5 日收到, 修改稿 1993 年 3 月 22 日收到.

* 国家自然科学基金资助项目.

表 1 硅片的透过特性测量 (片厚 0.4 mm)
Table 1 Measured transmittance of a silicon-chip with 0.4 mm thickness

波长 $\lambda/(\mu\text{m})$	67.5	74.2	90.4	151.5	281
透过率 $T(\%)$	52	61	68	68	71

硅-铝网栅可采用一般的光刻方法制备. 我们选用两面抛光便于准直的硅片, 选择光洁度和平行度好的片子作基片. 在硅片的一个表面上首先真空蒸镀上一层铝膜, 再经过一系列的光刻工序, 按设计参数制得金属网栅. 硅-铝网栅的显微照片如图 1 所示.

2 硅-铝网栅 F-P 干涉仪的性能

2.1 硅-铝网栅特性的测试

网栅主要的光学特性有光功率透过率 T 、反射率 R 、吸收损耗 A 和衍射损耗 D . 如果波长 λ 远大于网栅的光栅常数 g , 则衍射损耗 D 很小, 而硅片的吸收损耗 A 也很小, 则有 $T + R \approx 1$. 因此, 通过测量透过率 T 便可估算反射率 R . 几种结构参数不同的硅-铝网栅光学特性的测量值及计算值见表 2.

表 2 硅-铝网栅的光学特性 (测量波长 $\lambda = 90.4 \mu\text{m}$)
Table 2 Optical properties of Si-Al grids (measured at $90.4 \mu\text{m}$)

编号	结构参数		T 测量值 (%)	R 计算值 (%)
	$g(\mu\text{m})$	$2a/g$		
1	10	1/3	3	—
2	22	2/5	14	86
3	22	1/4	22	78
4	50	1/4	41	59

2.2 F-P 干涉仪的特性

反射率 $R = 75 \sim 90\%$ 的网栅适合作 F-P 干涉仪. 如果 R 太小, 则干涉仪分辨率太低; 若太大, 则干涉仪插入损耗大. 因此, 我们选 R 值适中的 2 号网栅用作 F-P 干涉仪.

F-P 干涉仪对单色信号源的传输响应, 即干涉特性的理论曲线可用 Airy 函数表达^[4], 而干涉仪性能可由反射精细度 F_r 和外品质因数 Q_e 描述, 即分辨率 RP 来描述^[5,6]

$$F_r = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R},$$

$$RP = \frac{\nu}{\delta\nu} = Q_e = \frac{d}{2\Delta d} = qF_r;$$

其中干涉阶数 $q = 2d/\lambda$, d 是两网栅间距, 而 Δd 是干涉峰的半高度宽度 (FWHM 值), ν 是信号频率, $\delta\nu$ 是干涉仪的频率分辨宽度. 在单色信号源的情况下, Δd 反映干涉仪的分辨率, 我们记作 Δd_{FPI} . 对于实际的信号源, 比如激光, 都具有一定的线宽, 则 Δd 的大小不仅与干涉仪的分辨率有关, 而且还和激光谱线的线宽有关. 因此, 干涉峰的宽度与形状在一定程度上反映出被测信号的频谱.

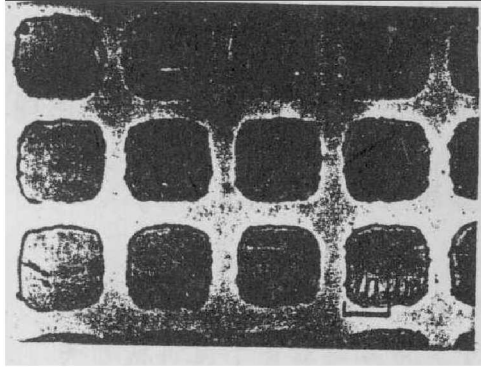


图 1 硅-铝网栅的显微照片
Fig. 1 Microscope photograph
of a Si-Al grid

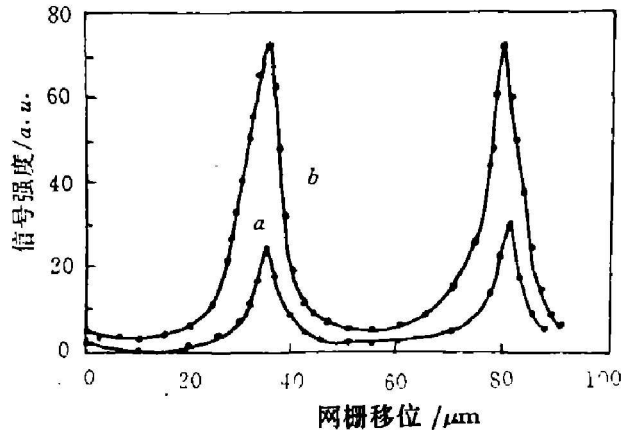


图 2 小型光泵 NH_3 亚毫米波激光器
辐射波束的 F-P 干涉图

(a) NH_3 工作气压为 $10 \times 133.3 \text{ Pa}$;
(b) NH_3 工作气压为 $50 \times 133.3 \text{ Pa}$

Fig. 2 F-P interferogram of a miniature optically pumped NH_3 submillimeter wave laser

我们的 F-P 干涉仪网栅的反射率 $R=86\%$, 在栅距 $d=2 \text{ mm}$ 时, 如果干涉仪有最佳的准直性, 则 $F_r=20.8$, $Q_e=915$, $\Delta d_{\text{FPI}} \approx 1 \mu\text{m}$, 干涉仪的波长分辨宽度 $\delta\lambda=0.1 \mu\text{m}$, 或频率分辨宽度 $\delta\nu=3.6 \text{ GHz}$.

3 F-P 干涉仪在激光频谱研究中的应用

在脉冲光泵 NH_3 分子远红外激光器小型化的研究中, 我们发现, 随着激光器长度的缩短, 工作气体的最佳气压升高, 使谱线宽度增大, 这将增加激光器的准连续可调谐范围^[7]. 我们通过 F-P 干涉图研究该激光器输出频谱的特性. 图 2 是由硅-铝网栅 F-P 干涉仪测量记录的脉冲光泵 NH_3 分子小型远红外激光器在 $\text{CO}_2-9\text{R}(16)$ 线泵浦时, 亚毫米波脉冲输出的干涉图. 由图 2 可见, 当工作气体压强较低时, 输出信号较弱, 干涉曲线也较窄; 随着工作气压加大, 输出信号增强, 干涉曲线也增宽了. 由工作气压为 $50 \times 133 \text{ Pa}$ 的干涉曲线测得 $\Delta d=10 \mu\text{m}$, 由于 $\Delta d \gg \Delta d_{\text{FPI}}$, 因此可以认为干涉曲线宽度主要由激光谱线宽度决定. 由于干涉阶数 $q = \frac{2d}{\lambda} \approx 44$, 干涉曲线色散加宽了 q 倍. 扣除色散加宽的影响, 可估算出谱线的宽度 $\Delta\lambda=0.2 \mu\text{m}$, 这与理论计算的结果很接近^[8]. 另外, 干涉曲线的形状略为不对称, 在靠近峰值处有拐点, 尤其是工作气压较高时更明显. 它反映了该激光谱线本身可能是一对双线, 这与理论分析是一致的^[9]. F-P 干涉图具有尖锐干涉峰, 为波长的测量提供了便利条件. 我们通过多个干涉峰间距的测量, 算出在 $\text{CO}_2-9\text{R}(16)$ 线光泵时, NH_3 分子远红外辐射输出的谱线中心波长为 $90.36 \mu\text{m}$, 这与文献 [10] 的数值相一致.

4 结论

单晶硅薄片很适合作为亚毫米波 F-P 干涉仪用金属网栅的基片. 用光刻方法制得的硅-铝网栅线条细密, 特别适合短波段的要求. 这种方法也适合制作具有复杂图形的网栅.

致谢: 感谢丘秉生教授对本文提出的建议与帮助.

参考文献

- 1 Ulrich R. *Appl. Opt.*, 1969;8(2):319
- 2 Lecullier J C *et al. Infrared Phys.*, 1976;16:237
- 3 Yoshinaga H. *Phys. Rev.*, 1955;100:753
- 4 Ulrich R *et al. IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1963;MTT-11(5):363
- 5 林贻莹等. 中山大学学报(自然科学版), 1981;4:38
- 6 G R 福尔斯. 现代光学导论, 上海: 上海科学技术出版社, 1980
- 7 Lin Y *et al. 11th Int. Conf. on IR and MMW*, 1986;Digest:26
- 8 印宏. 中山大学研究生院硕士学位论文, 1992
- 9 Lin Y *et al. 17th Int. Conf. on IR and MMW*, 1992;Digest:312
- 10 Weiss C O *et al. Review of IR and MMW*, 1984;2: edited by K J Button

Si-Al GRID SUBMILLIMETER WAVE F-P INTERFEROMETER AND ITS APPLICATION TO LASER SPECTRUM OBSERVATION*

ZHENG XINGSHI**, LI YAO**, LIN YIKUN**, CHEN BAOQIONG***

(***Electronics Department*, ****Physics Department*, *Zhongshan University*,
Guangzhou, Guangdong 510275, China)

Abstract: Silicon chip-based aluminium metallic grids with desired characteristics were made and used in the submillimeter wave F-P interferometer. This FPI is suitable for wavelength measurement and laser spectrum observation, especially for short submillimeter wave range.

Key words: submillimeter wave, F-P interferometer, optically pumped FIR laser.

*The project supported by the National Natural Science Foundation of China.