

毫米、亚毫米波极化干涉仪的设计考虑*

丘秉生 陈丹立 罗锡璋 郑兴世

(中山大学电子系, 广东, 广州)

摘要——本文从准光技术考虑出发, 分析了高斯光束参数对于极化干涉仪性能的影响. 提出了用介质透镜改善毫米波-亚毫米波极化干涉仪的性能.

关键词——极化干涉仪, 毫米波, 亚毫米波, 波束参数.

1. 引 言

极化干涉仪即 Mach-Zehnder 干涉仪是毫米、亚毫米波段应用较广的准光系统. 自 1970 年 Martin 和 Puplett^[1] 提出了用极化线栅作分束器组成极化干涉仪以来, 得到了较广泛的应用. 它是双束傅里叶变换谱仪的重要部件^[2], 在超外差接收中可作双工器、单向器使用^[3], 也可用它测量材料的介质特性^[4]. 1983 年 Simonis 和 Felock^[5] 用它组装成工作于 245 GHz 的双工器、单向器, 给出了实验结果, 但未给出光束参数和理论分析. 本文从极化干涉仪用作准光系统元件角度出发, 分析计算了高斯光束参数对极化干涉仪性能的影响, 提出了设计依据, 在此基础上提出用介质透镜改善它性能的可能性. 用波长为 337 μm (890 GHz) 辐射源进行了实验验证. 本文为设计毫米、亚毫米波段准光双工器、单向器提供了依据.

2. 极化干涉仪的结构及工作原理

极化干涉仪结构如图 1 所示. 由 4 块极化栅网及角反射镜 M 构成. 起偏器 P_1 及检偏器 P_2 取向与水平方向成 135° ; 分束器 D_1 及 D_2 的栅线取水平方向. 入射波经 D_1 后分成极化互相垂直的波束 A 和 B ; 经 D_2 合成后, 极化规律随光程差 Δ 而变, 当 $\Delta = n\lambda$ 或 $(2n + 1)\frac{\lambda}{2}$ 时为线极化波; 当 $\Delta = (2n + 1)\frac{\lambda}{4}$ 时为圆极化波, 经 P_2 检偏后其输出功率按余弦变化^[1]

$$P_{\text{out}} = \frac{P_0}{4} [1 + \cos(2\pi\Delta/\lambda)]. \quad (1)$$

本文 1988 年 7 月 19 日收到.

* 国家自然科学基金资助项目.

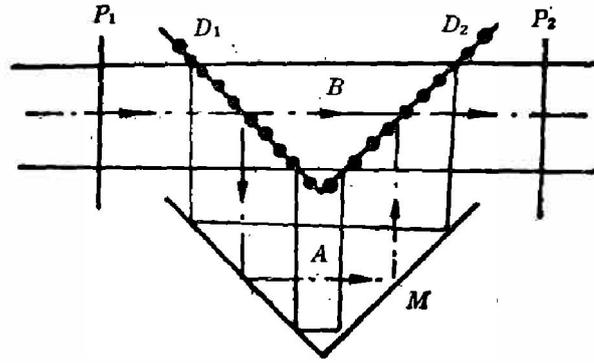


图 1 极化干涉仪

Fig. 1 A polarizing interferometer.

3. 理论分析和计算

工作于可见光及红外波段的极化干涉仪, 由于波长短, 光束发散角小, 常忽略其衍射效应^[6], 但在毫米、亚毫米波段, 衍射效应是不能忽略的, 基于这一事实, 下面根据高斯光束的耦合及截舍理论对极化干涉仪的性能及设计考虑进行分析和计算。

3.1 极化干涉仪的调制度及调制比

由辐射源发出的基模高斯光束, 沿干涉仪光轴传播, 波束 *A* 和 *B* 具有相同腰斑半径 W_0 及程差 Δ , 经 D_2 合并后再由 P_2 检偏, 其功率耦合系数 $K_{1,2}$ 可表示为^[7]

$$K_{1,2} = \frac{1}{2} \left\{ 1 - 2R(1-R) \left[1 + \frac{\cos\theta + \alpha \sin\theta}{1 + \alpha^2} \right] \right\}; \quad (2)$$

其中, R 为分束器反射系数; $\alpha = \lambda\Delta/2\pi W_0^2$; $\theta = 2\pi\Delta/\lambda$. 求 K 对 θ 的极值, 并在 $R=0.5$ 下由式(2)得

$$K_{1,2\max,\min} = \frac{1}{8} \left[1 \pm \frac{1}{(1 + \alpha^2)^{1/2}} \right]^2. \quad (3)$$

因此, 极化干涉仪的调制度 M 及调制比 I 分别为

$$M = \frac{K_{\max} - K_{\min}}{K_{\max} + K_{\min}} = \frac{2\sqrt{1 + \alpha^2}}{2 + \alpha^2}; \quad (4)$$

$$I = 10 \log_{10} \frac{K_{\max}}{K_{\min}} = 20 \log_{10} \left[\frac{\sqrt{1 + \alpha^2} + 1}{\sqrt{1 + \alpha^2} - 1} \right]. \quad (5)$$

由式(2)~(5)可见, 调制度及调制比与辐射源的光斑半径 W_0 、工作波长及光程差有关. 表 1 给出 $\lambda=337 \mu\text{m}$, $W_0=2.2 \text{ mm}$ 条件下的计算结果.

由表 1 计算结果表明, 光程差 Δ 越小, M 及 I 越大.

3.2 光程差 Δ_{\min} 的确定

上一节的计算是假定极化线栅尺寸为无限大的条件下得到的, 而实际上线栅尺寸是有限的, 当高斯光束通过线栅时, 有部份功率被截舍, 造成干涉仪的损耗. 基模高斯光束通过半径为 a 的园孔障碍物时, 透射效率与孔径 a 及光斑半径 W 的关系可表示为^[8]

表 1 不同光程差 Δ 下, 参数 α 、 M 及 I 的计算值
 Table 1 Calculated values of α , M and I versus path-length difference Δ .

$\Delta(\text{mm})$	20	40	60	80	100	120
α	0.222	0.443	0.665	0.887	1.108	1.330
M	0.999	0.996	0.984	0.960	0.925	0.883
$I(\text{dB})$	38.5	23.5	20.4	18.4	17.0	16.0

$$T_E = 10 \log_{10} [e^{+2\alpha^2/W^2}] = 8.686 \left(\frac{\alpha}{W} \right)^2. \quad (6)$$

例如, 当 $T_E = 20 \text{ dB}$, 由式(6)算得 $\alpha = 1.52W$ 时, 有 1% 输入功率被截舍. 此外, 有限孔径还导致波瓣加宽和旁瓣的产生. Goldsmith^[8] 的文章给出有关计算曲线, 可供设计参考.

从式(6)可见, 要减少损耗, 必须增加 α 值, 从图 1 所示几何关系, 为保证截舍损耗小于 1%, 光程差必须满足

$$\Delta \geq 2 \left(1.52W + \frac{L}{2} \cos 45^\circ \right); \quad (7)$$

其中, L 为极化栅网框架的宽度. 显然, 如果要减少光程差, 必须以增大损耗为代价. 因此, 进行机械结构设计时, 应根据实际应用的要求, 折衷考虑. 而支撑栅网的框架应在保证强度下减少尺寸. 例如, 辐射源波长为 $337 \mu\text{m}$, W_0 为 2.2 mm , 干涉仪中央距辐射源为 330 mm 时, 该处光斑半径 W 为

$$W = W_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda d}{\pi W_0^2} \right)^2 \right]^{1/2}; \quad (8)$$

由式(8)可求得 $W = 14.8 \text{ mm}$. 按每块栅网截舍损耗 1% 的要求, 栅网半径 $\alpha = 1.52W = 22.5 \text{ mm}$, 框架的金属部分宽度为 8 mm , 则栅网框架总宽度 $L = 61 \text{ mm}$. 由式(7)可求得

$$\Delta_{\min} = 86.4 \text{ mm}.$$

3.3 介质透镜对极化干涉仪性能的改进

减少光程差对极化干涉仪性能的影响, 已报道的方案有两个: 一是改用极化迈克尔逊干涉仪^[1], 另一方案如图 2^[7] 所示; 两个方案均可使光程差趋近于零, 但所用元件较多. 为此, 本文提出用介质透镜改善极化干涉仪性能的方法, 示意图见图 3.

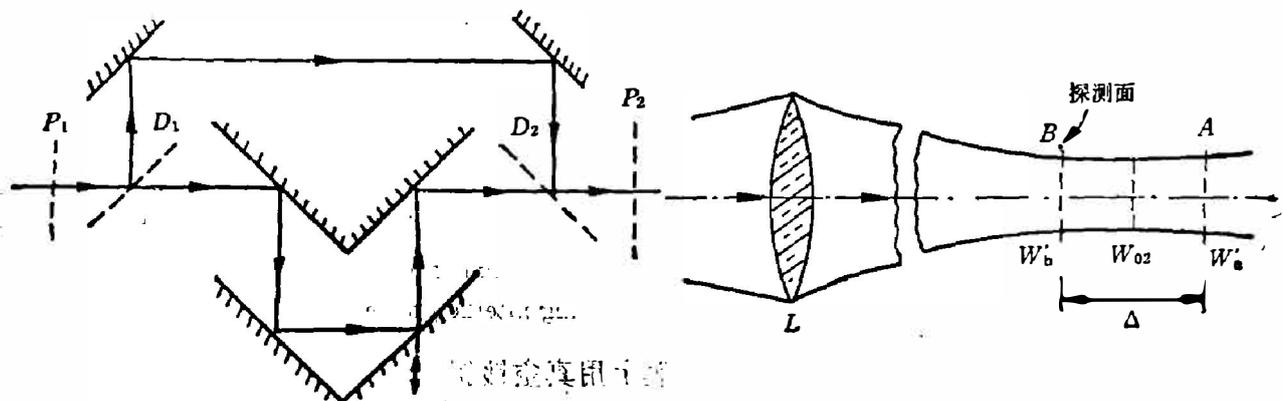


图 2 零程差极化干涉仪

Fig. 2 A zero path-length difference polarizing interferometer.

图 3 介质透镜改善干涉仪性能示意图

Fig. 3 A dielectric lens used to improve the performance of the polarizing interferometer.

在极化干涉仪与辐射源之间,置一焦距为 f 的介质透镜,探测参考面位于 B 点,它距新的光腰 W_{02} 的位置为 $\Delta/2$. 这样,直线传播的光束 B 到达探测面时,光斑半径为 W'_b ,而经过角反射镜的光束 A ,延迟了 Δ 光程,到达探测面时光斑半径为 W'_a ,由图可知 $W'_a \approx W'_b$,从而减少了交迭损耗. 而且,由于透镜的聚焦作用,使光斑减少,因此,截舍损耗随之减小,从而提高了极化干涉仪的性能.

按高斯光束成像矩阵变换公式,可推导出输出光腰位置 d_{out} 及腰斑半径 W_{out} 表示式:

$$d_{out} = f \left[\frac{d_{in}}{f} \left(\frac{d_{in}}{f} - 1 \right) + \left(\frac{\pi W_0^2}{\lambda f} \right)^2 \right] / \left[\left(\frac{d_{in}}{f} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\pi W_0^2}{\lambda f} \right)^2 \right]; \quad (9)$$

$$W_{out} = W_0 \left[\left(\frac{d_{in}}{f} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\pi W_0^2}{\lambda f} \right)^2 \right]^{-1/2}. \quad (10)$$

4. 实验装置及测量结果

实验测试装置如图 4 所示.

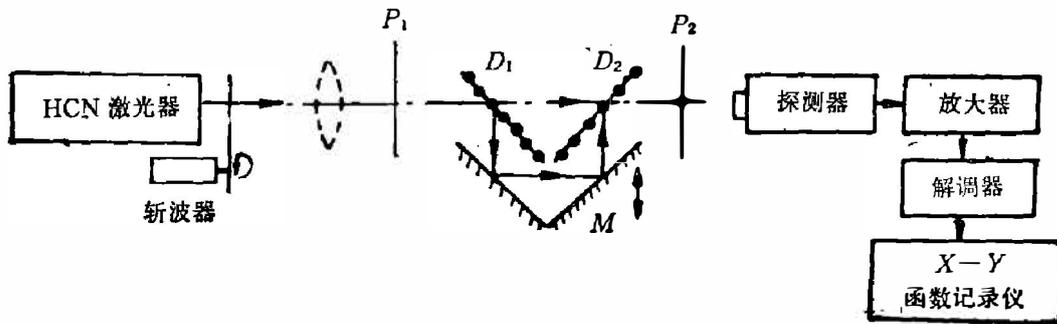


图 4 测量极化干涉仪性能的装置

Fig. 4 The set-up for measuring the performance of the polarizing interferometer.

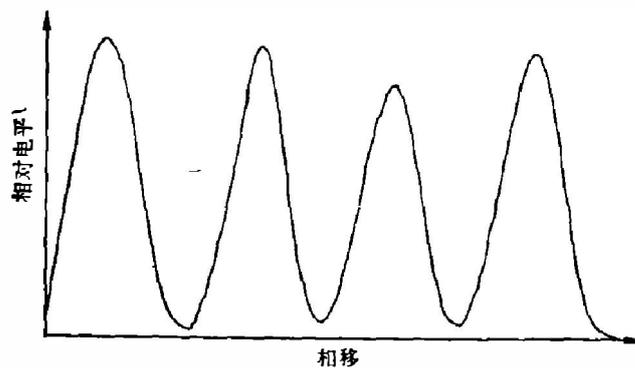


图 5 测量极化干涉仪调制度和隔离比的干涉图

Fig. 5 The measured interferogram for determining modulation M and isolating ratio I of the polarizing interferometer.

极化栅网是在 $12.5 \mu\text{m}$ 厚的 Mylar 薄膜上用真空镀铝光刻工艺制作的,金属栅线宽为 $10.2 \mu\text{m}$,线栅常数为 $20.4 \mu\text{m}$,面积为 $36 \times 36 \text{ mm}^2$. 实验测得极化率优于 99.5% ,损耗小于 2% . 辐射源用波长为 $337 \mu\text{m}$ 的 HCN 激光器,频率稳定度优于 2×10^{-7} . 经测量输出光腰半径为 2.2 mm . 组装成的极化干涉仪,用微型马达带动角反射镜平稳移动. 光

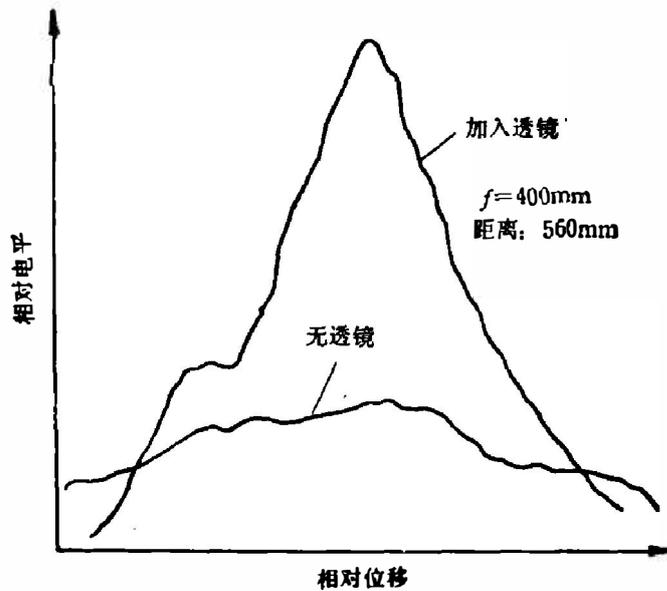


图6 介质透镜对高斯光束的聚焦

Fig. 6 Gaussian beam focusing by dielectric lens.

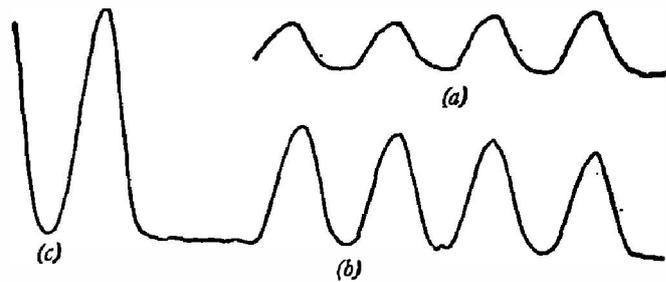


图7 介质透镜极化干涉仪性能

(a) 无透镜 (b) 加透镜 $f=250\text{ mm}$ (c) 加透镜 $f=200\text{ mm}$

Fig. 7 Measured interferograms of the polarizing interferometer.

(a) without lens (b) lens with $f=250\text{ mm}$ (c) lens with $f=200\text{ mm}$.

程差约为 100 mm , 用 X-Y 记录仪记录调制的曲线。实验结果见图 5。加介质 Teflon 透镜后的结果见图 6、7。

从干涉图可求得, 无透镜时调制度 $M \approx 92\%$, 调制比 $I = 14.7\text{ db}$; 加透镜后, $M \approx 97\%$, $I = 19.4\text{ db}$, 结果比无透镜时改善 4 dB 。而且, 这一实验结果与理论计算结果符合得较好。

参 考 文 献

- [1] Martin D. H. and Puplett E., *Infrared Phys.* **10**, (1970), 105.
- [2] Burton C. H. and Akimoto Y., *Infrared Phys.* **20** (1980), 115.
- [3] Ediss G. A. et al., *Int. J. Infrared and MM Waves*, **8**(1987), 125.
- [4] 罗锡璋, 陈丹立, 郑兴世, 丘秉生. 第三次全国毫米、亚毫米波会议论文集 1986, 460.
- [5] Simonis G. J. and Felock R. D., *Int. J. Infrared and MM Waves*, **4** (1983), 157.
- [6] Lambux D. K. and Richards P. L., *Appl. Opt.*, **17** (1978), 595.
- [7] Goldsmith P. F., *Infrared and MM Waves*, Ed. by K. J. Button, **6** (1982), chap. 5.
- [8] Goldsmith P. F. *Int. J. Infrared and MM Waves*. **8** (1987), 711.

CONSIDERATION ON THE MMW AND SMMW POLARIZING INTERFEROMETER DESIGN*

QIU BINGSHENG CHEN DANLI LUO XIZHANG ZHENG XINGSHI

(Department of Electronics, Zhongshan University, Guangzhou, Guangdong, China)

ABSTRACT

Based upon the quasi-optical technique consideration, the dependence of the performance of a polarizing interferometer on the Gaussian beam parameters is analysed. It is proposed to use a dielectric lens to improve the performance of a MMW-SMMW polarizing interferometer.

* Project supported by the Fund of the Natural Sciences of China.