

一种制作 W 波段自立式线栅极化器的新方法

张勇芳¹, 苗俊刚¹, 姜景山²

(1. 北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191;

2. 中国科学院空间中心, 北京 100190)

摘要:设计并制作了一个 W 波段的极化器,设计参数为金属丝直径 100 μm ,间距 300 μm . 实测结果表明,金属丝直径和间距的均值分别为 100.3 μm ,300.2 μm ;标准差为 5.2 μm ,8.3 μm ,表明极化器具有较高的加工精度和良好的均匀性;同时其表面平整度优于 30 μm . 另外,测试了极化器的透射系数以及极化器作为可变衰减器时的透射系数,测试结果与理论计算结果具有良好的一致性,具有良好的极化性能.

关键词:极化器;自立式线栅;W 波段;加工工艺

中图分类号:TN61 文献标识码:A

A method for fabricating free-standing polarizer grids for W-band

ZHANG Yong-Fang¹, MIAO Jun-Gang¹, JIANG Jing-Shan²

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Center for Space Science and Applied Research, Beijing 100190, China)

Abstract: This paper demonstrates the designing and fabrication process of a W-wave polarizer with fine metal wires. The wires were designed to be 100 μm in diameter and 300 μm between each other. The mean values of these two parameters of the fabricated wire are 100.3 μm and 300.2 μm , with the standard deviations 5.2 μm and 8.3 μm respectively. Results show that the polarization grid has high fabrication precision and uniformity, and the polarizer surface flatness is better than 30 μm . In addition, the power transmission coefficient was measured. The actual measurement results and theoretical calculation results agree with each other perfectly. The polarizer fabricated by this new method has excellent performance.

Key words: polarizer; free-standing wire grids; W-band; manufacture

PACS: 07.57.-c

引言

在毫米波段,极化器是一种重要的器件,有着广泛的应用,可用作极化旋转器,可变衰减器等.极化器由细金属丝平行排布形成的金属线栅构成,其性能由细金属丝直径 d 和间距 g 决定^[1-3].金属细丝直径和间距的选取和波长 λ 有关^[1-3],一般而言, $g \leq \lambda/4, d \leq \lambda/10$.

缠绕工艺制作自立式线栅极化器是一种常用方法^[4,5],文献[4]提出了一种用于制作自立式金属线栅的金属细丝缠绕方案,文献[5]对文献[4]中的缠

绕设备做出了改进,进一步提高了极化器金属线栅的均匀性,并分析了金属丝间距 g 对极化器交叉极化性能的影响.实际使用中,缠绕法特别适合于毫米波高频段($\lambda < 1 \text{ mm}$)金属线栅的制作,复杂的缠绕装置可以实现极细金属丝的缠绕和较高的间距均匀性.目前的工艺水平可以加工制作金属丝直径 5 μm ,间距 12.5 μm 的极化器^[2].

在毫米波低频段,较长的波长使得金属线栅中金属丝直径 d 和间距 g 也相对较大,这降低了金属线栅的制作难度,文献[6]设计了一种简单的缠绕装置,用于制作工作在 37.5 GHz 的极化器.在毫米

收稿日期:2012-02-17,修回日期:2012-10-22

基金项目:国家自然科学基金(41105007)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(41105007)

作者简介(Biography):张勇芳(1984-),男,山西太原人,博士研究生,主要研究方向为毫米波准光学器件与系统设计、测试.

E-mail: buaazyf@163.com

Received date: 2012-02-17, revised date: 2012-10-22

波低频段,采用腐蚀工艺加工金属线栅是一种非常合适的加工方法,腐蚀工艺的加工精度为 $20\ \mu\text{m}$,可以满足金属线栅的加工精度要求.采用腐蚀工艺制作金属线栅,可以一次成型,无需复杂的金属丝缠绕设备,加工时间短,加工成本低,且具有较高的加工精度.

1 极化器金属线栅

极化器用来实现对不同极化状态线极化波的透射和反射.如图 1 所示,线极化波束照射金属线栅时,电场方向平行于金属丝的波束将被反射,而电场方向垂直于金属丝的波束透射通过.图中 d 表示金属细丝直径, g 表示金属丝间距,也称为线栅周期.

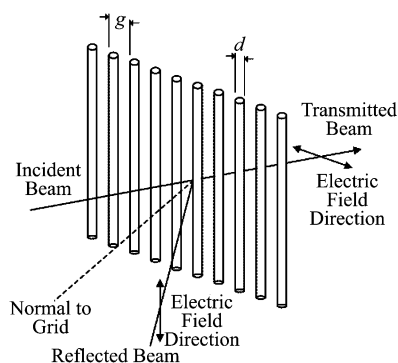


图 1 金属线栅
Fig. 1 Metal wire grids

极化器的性能由金属细丝的直径 d 和间距 g 决定^[1-3],当 $g/\lambda \leq 0.5$ 时,极化器具有良好的性能^[2,3].文献[3]计算了在 $0 < g/\lambda \leq 0.5$ 内,不同 d/g 时极化器的极化性能,并以曲线形式给出了计算结果,这些曲线常被用来设计极化器^[3,6].另外,极化器金属线栅的表面起伏会对相位产生影响^[7],实际使用中要求金属线栅具有较高的表面平整度.

由文献[3]的计算结果可知, $g/\lambda = 0.1$, $d/g = 0.33$ 的极化器,具有优良的极化性能,可视为理想极化器.在 W 波段, $\lambda \approx 3\ \text{mm}$,理想极化器的金属线栅参数为 $d = 100\ \mu\text{m}$, $g = 300\ \mu\text{m}$.

2 极化器的制作

采用腐蚀工艺加工金属线栅,其金属丝横截面形状不是圆形而是近似于矩形.事实上,理想极化器的性能与金属细丝横截面形状无关^[2].用于制作金属线栅的材料应当具有足够的拉伸强度以及较高的电导率^[6-7],适合的材料包括钨,钼以及不锈

钢^[7],文中所用的材料为不锈钢.

首先,采用腐蚀工艺加工不锈钢薄片(厚度为 $100\ \mu\text{m}$)制作金属线栅.图 2 所示为加工得到的金属线栅,金属丝直径 $d = 100\ \mu\text{m}$,间距 $g = 300\ \mu\text{m}$,金属丝长度 $l = 140\ \text{mm}$.

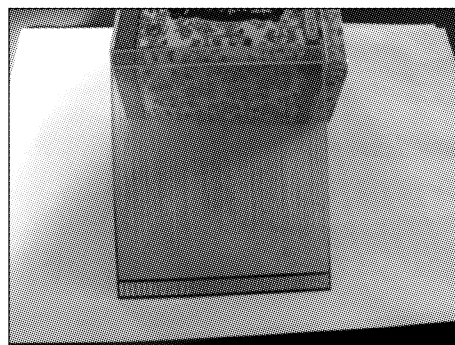


图 2 腐蚀法加工的金属线栅
Fig. 2 Fabricated wire grids by chemical etching

其次,拉伸金属线栅.如图 2 所示,未经拉伸的金属线栅松弛且间距不均匀,为了获得良好的极化性能,应当拉伸金属线栅,使得金属丝间距均匀且保持良好的机械性能.图 3 所示为用于拉伸金属线栅的装置,其中 A_1 , A_2 所示为拉伸固定板,用于固定金属线栅;B 为精密升降台用于实现极化器框架的平稳上升,由上下两部分组成,上部为慢速升降台,下部为快速升降台;C 为精密导轨用于实现 A_1 的平稳移动.该设备可用于制作有效尺寸 $140\ \text{mm}$ 以下的极化器.

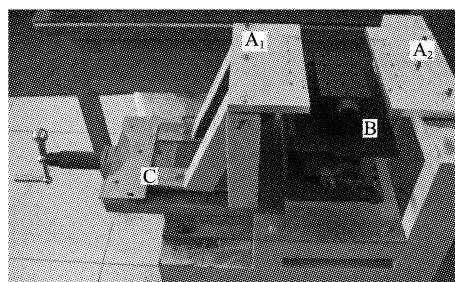


图 3 金属线栅拉伸装置
Fig. 3 Device for stretching wire grids

最后,采用固化剂将金属线栅与极化器框架粘到一起.固化剂通常由环氧树脂和一些催化剂调配而成^[7].采用环氧树脂 E44 与低分子聚酰胺树脂按体积比 1:1 混合而成的固化剂.将金属线栅固定于 A_1 , A_2 两固定板后,移动 A_1 将金属线栅拉伸平整,摇动 B 中的快速升降台,使极化器框架靠近金

属线栅,调节慢速升降台,使得极化器框架与金属线栅紧密接触,涂敷固化剂,待固化剂充分固化后(常温下,固化时间约为 24 h),取下极化器,去掉多余的金属丝,完成极化器的制作.

按照上述的工艺流程加工的 W 波段极化器如图 4 所示,其有效尺寸为 53 mm,共有 178 条金属细丝. 图 4(a)为极化器正面,图 4(b)为极化器背面.

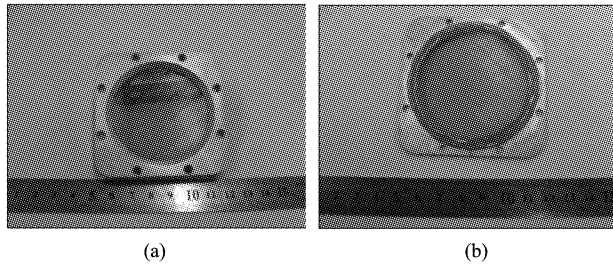


图 4 W 波段极化器 (a) 正面, (b) 背面
Fig. 4 W-band polarizer (a) front side, and (b) back side

3 极化器的测试

3.1 金属线栅的测试

测试了极化器中金属丝直径 d 和间距 g , 测量仪器为精密影像测量仪,其测试精度可达 $1 \mu\text{m}$, 图 5 所示为金属线栅某区域在影像测量仪中放大后的图像. 测试并记录了金属线栅中所有的金属丝直径 d 和间距 g , 并分别以 $5 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 为间隔给出直径与间距分布数, 如图 6 所示. 其中图 6(a)为金属丝直径 d 的分布数, 图 6(b)为间距 g 的分布数.

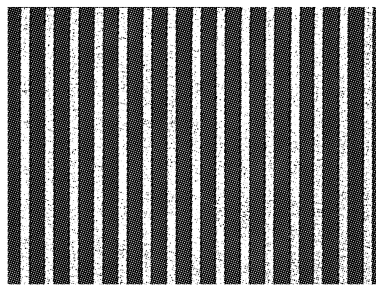


图 5 影像测量仪放大后的金属线栅
Fig. 5 Image of wire grids magnified by micro imager

对金属直径和间距测试结果作相应的统计分析, 结果如表 1 所示, 金属丝直径 d 与间距 g 的测试均值分别为 $100.3 \mu\text{m}$ 和 $300.2 \mu\text{m}$; 标准差分别为 $5.3 \mu\text{m}$ 和 $8.2 \mu\text{m}$, 由此可得金属线栅间距 g 的标准差与间距 g 的测试均值比值为 0.027, 这表明极化器金属线栅具有良好的均匀性. 表 1 中的第 4 列

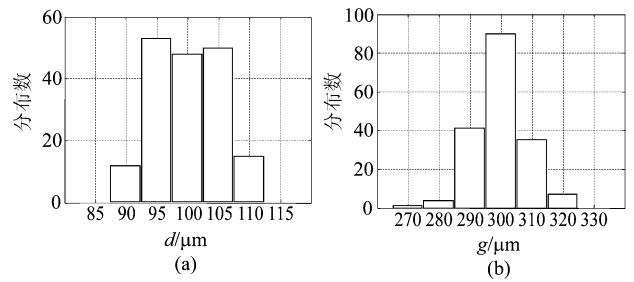


图 6 金属线栅直径与间距分布 (a) 金属丝直径, (b) 间距
Fig. 6 Distribution of (a) the diameter of the wires, and (b) space between them

所示为金属丝直径 d 和间距 g 的实测值分别在 $(100 \pm 5) \mu\text{m}$, $(300 \pm 5) \mu\text{m}$ 范围内出现的数目占总数 (共有 178 条金属丝) 的比例; 第 5、6 列分别所示为在 $\pm 10 \mu\text{m}$, $\pm 20 \mu\text{m}$ 范围内的比例.

表 1 金属线栅直径与间距设计值与测试值
Table 1 Design and measurement values of wire diameter and space between wires

设计值/ μm	测试均值/ μm	标准差 $\sigma/\mu\text{m}$	$\pm 5 \mu\text{m}$	$\pm 10 \mu\text{m}$	$\pm 20 \mu\text{m}$
$d = 100$	100.3	5.3	66.3%	98.9%	100%
$g = 300$	300.2	8.2	52.8%	79.2%	98.3%

另外, 测试了极化器金属线栅的表面平整度, 其表面起伏小于 $30 \mu\text{m}$, 远小于 W 波段的工作波长, 具有较高的表面平整度, 由此引入的相位误差可以忽略不计.

3.2 极化器透射系数测试

极化器透射系数的测试原理如图 7 所示, 图中 P 为极化器, H_1 为发射喇叭, H_2 为接收喇叭. 极化器透射系数为 $T = P_t/P_{\text{all}}$, 其中 P_{all} 表示当 H_1 与 H_2 之间没有极化器时, 由 H_2 接收到的辐射波束的总功率, P_t 表示当 H_1 与 H_2 之间插入极化器后, H_2 接收到的透射波束功率.

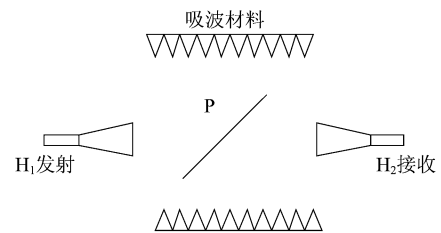


图 7 极化器透射系数测试
Fig. 7 Measurement of the polarizer transmission coefficient

实际测试中, 对于理想的极化器, 当金属丝与电场垂直时, P_t 与 P_{all} 几乎相等, 极化器的透射系数 T

近似为 1. 这种情况下,通过图 7 所示的单点测试方法测量得到的透射系数 T 具有较低的测试精度. 图 8 所示为实际的测试结果,可以明显看出透射系数 T 的测试精度较低,甚至出现了大于 1 的不合理情况.

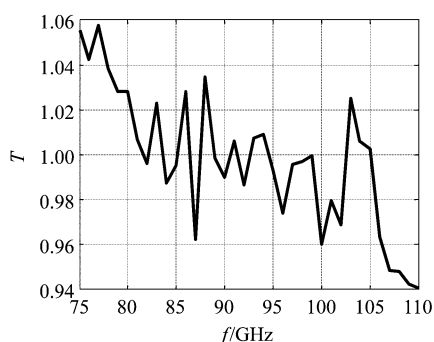


图 8 极化器透射系数
Fig. 8 Polarizer transmission coefficient

为了得到合理且精度较高的测试结果,对图 7 所示的单点测试方法做了修改,如图 9 所示,利用波导探头扫描波束近场分布,假设扫描点处的相对电场强度为 E_i ,则扫描波束近场分布得到的功率近似为 $P = \sum |E_i|^2$. 分别扫描有无极化器时的波束近场分布,得到有极化器时的透射通过功率 P_t 与没有极化器时的功率 P_{all} ,进而得到透射系数 T . 扫描近场分布时,扫描平面的大小以边缘电平下降 30 dB 为标准选取,同时扫描间隔为 1 mm.

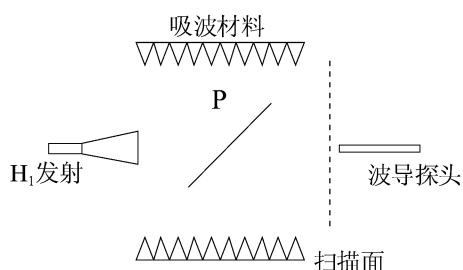


图 9 扫描测试极化器透射系数
Fig. 9 Measure polarizer transmission coefficient by scanning near-field distribution

采用上述方法测量极化器的透射系数,当极化器金属丝垂直于电场时,透射系数测试结果如图 10 所示,图 10(a)为极化器透射系数,图 10(b)为透射系数,单位为 dB. 图 10(a)中的透射系数在全频段内小于 1,表明透射系数的测试结果是合理的;由图 10(b)可知,参数为 $g/\lambda = 0.1$, $d/g = 0.33$ 的极化器其插入损耗在 W 波段内约为 0.1 dB. 当极化器金

属丝平行于电场时,透射系数的测试结果如图 11 所示,由图 11 中的曲线可知,此时极化器的插入损耗大于 27 dB,即透射通过极化器的波束功率小于 0.2%,表明极化器具有很高的极化隔离性能. 图 10 与图 11 的测试结果与文献[3]的计算结果基本吻合;同时该极化器也具有较小的交叉极化分量,当金属线栅间距的标准差 σ 与间距 g 的比值为 $\sigma/g \approx 0.027$ 时,极化器的交叉极化分量小于 0.3% [5].

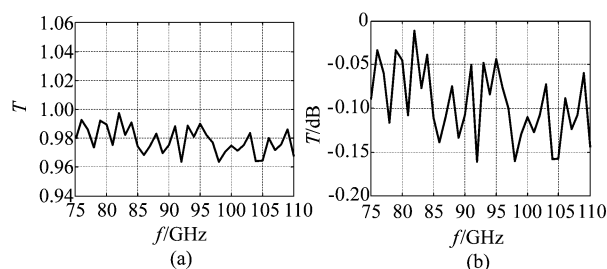


图 10 金属丝垂直于电场时极化器的透射系数
Fig. 10 The transmission coefficient with wire perpendicular to the electric field

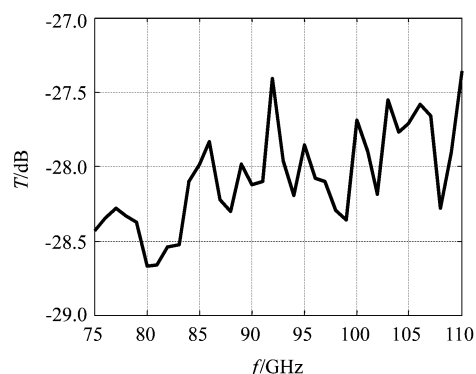


图 11 金属丝平行于电场时极化器的透射系数
Fig. 11 The transmission coefficient with wire parallel to the electric field

3.3 可变衰减器测试

改变理想极化器中金属丝与电场方向之间的夹角 θ ,若夹角 θ 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间变化时,极化器透射系数 T 会在 $0 \sim 1$ 之间发生变动,此时极化器可视为一个可变衰减器.

实际加工的 W 波段极化器作为可变衰减器时,透射系数 T 与夹角 θ 之间的实测曲线如图 12 所示,波束的入射角为 30° ,夹角 θ 的旋转范围从 0° 到 360° ,角度间隔为 2° . 图 12 所示为 75 GHz 处的测试结果,图 12(a)所示结果由图 7 所示的单点测试方法得到. 当夹角 θ 在 90° 和 270° 附近时,透射系

数的测试结果出现较大偏差,而在其他角度范围内,测试结果与理论计算结果基本重合.因此对夹角在 $80^\circ \sim 100^\circ$ 和 $260^\circ \sim 280^\circ$ 两个区间内,采用图9所示的扫描法测试透射系数,对图12(a)的测试曲线进行修正,最终的测试曲线如图12(b)所示,实测结果与理论计算结果具有很高的一致性.

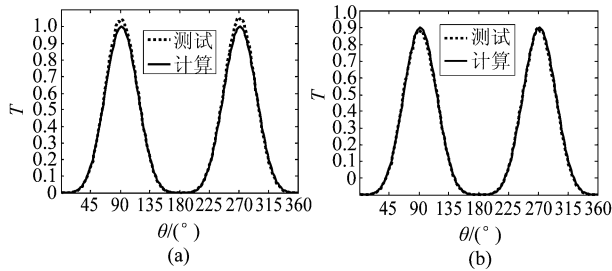


图12 可变衰减器的透射系数 (a) 单点测试, (b) 扫描测试

Fig. 12 Power transmission coefficient of variable attenuator (a) single point measurement, and (b) scanning measurement

4 结论

介绍了一种通过腐蚀工艺加工金属栅网并完成极化器制作的新方法. 据此方法设计并制作了一个应用于W波段的极化器,其有效尺寸为53 mm,设计参数为金属丝直径 $100 \mu\text{m}$,间距 $300 \mu\text{m}$,共有178根金属细丝. 实测结果表明,极化器具有良好的均匀性,金属丝直径和间距的均值分别为 $100.3 \mu\text{m}$ 和 $300.2 \mu\text{m}$,标准差分别为 $5.3 \mu\text{m}$ 和 $8.2 \mu\text{m}$;另外,加工完成的极化器具有较高的表面平整度,其表面起伏小于 $30 \mu\text{m}$.

在W波段内,测试了极化器的透射系数,当金属丝垂直于电场时极化器的插入损耗约为0.1 dB,当金属丝平行于电场时极化器的插入损耗大于27 dB. 另外,极化器作为可变衰减器时,测试了金属细丝和电场方向之间的夹角在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间变化时的透射系数曲线,实测结果和理论计算结果基

本重合. 实际测试结果表明,该极化器具有极低的插入损耗和较高的极化隔离性能以及很小的交叉极化分量,在W波段具有优良的极化性能.

相较于缠绕法中复杂的装置设备和昂贵的加工成本,新的加工方法工艺流程简单,制作周期短,加工成本低,并且制作完成的极化器具有较高的加工精度和良好的电气性能. 另外,随着频率的升高,由文献[3]中的计算结果可知,在150 GHz时,该极化器的透射系数,能够满足110~150 GHz内极化器的一般应用需求.

致谢

感谢北航微波工程实验室的工程师在制作极化器拉伸装置方面给予的大力帮助.

REFERENCES

- [1] Larsen T. A survey of the theory of wire grids[J]. *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1962, **10**(3): 191-201.
- [2] Goldsmith P F. *Quasi-optical systems: Gaussian beam quasi-optical propagation and applications*[M]. New York: Wiley-IEEE Press, 1998: 192-193.
- [3] Chambers W G, Costley A E, Parker T J. Characteristic curves for the spectroscopic performance of free-standing wire grids at millimeter and sub-millimeter wavelengths[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1988, **9**(2): 157-172.
- [4] Costley A E, Hursey K H, Neill G F, et al. Free-standing fine wire grids: their manufacture, performance and use at millimeter and sub-millimeter wavelengths[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1977, **67**(7): 979-981.
- [5] Shapiro J B, Bloemhof E. Fabrication of wire-grid polarizers and dependence of sub-millimeter wave optical performance on pitch uniformity[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1990, **11**(8): 973-980.
- [6] Lahtinen J, Hallikainen M. Fabrication and characterization of large free-standing polarizer grids for millimeter waves[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1999, **20**(1): 3-20.
- [7] Voellmer G M, Bennett C, Chuss D T, et al. A large free-standing wire grid for microwave variable-delay polarization modulation[C]. In: Society of photo-optical instrumentation engineers (SPIE) conference series, Proceedings of SPIE, 2008: 1-12.