

毫米波在 SiO₂ 基底材料中的传播特性

刘华松,余俊宏,冷 健,庄克文,季一勤

(天津市薄膜光学重点实验室 天津津航技术物理研究所,天津 300192)

摘 要: 红外/毫米波分频器件是红外/毫米波复合探测系统的关键器件之一。利用电磁波干涉理论计算和分析了介质材料特征参数对毫米波透射、反射和吸收性能的影响。针对工作频率为 35GHz 的电磁波,给出了介质材料厚度设计的准则,分析了 SiO₂ 材料不同物理厚度和物理厚度偏差对毫米波传输性能的影响。分析结果表明:基底物理厚度越大,基底物理厚度偏差对毫米波透射、反射和吸收性能的影响就越大,要求也越精确。对红外/毫米波分频器件的设计有一定的参考价值。

关键词: 红外/毫米波; 物理厚度; 厚度偏差

中图分类号:O436.1 文献标志码:A 文章编号:1007-2276(2014)04-1145-05

Millimeter-wave propagation characteristics in SiO₂ fundus materials

Liu Huasong, Yu Junhong, Leng Jian, Zhuang Kewen, Ji Yiqin

(Tianjin Key Laboratory of Optical Thin Film, Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300192, China)

Abstract: IR/MMW frequency divider is one of the key devices of IR/MMW composite-detected system. The influence of dielectric material characteristic parameters on millimeter-wave transmission, reflection and absorption properties were analyzed and calculated, which was based on theory of electromagnetic interference. The dielectric material thickness design guidelines in 35 GHz was put forward, the influence of SiO₂ material different physical thickness and physical thickness deviation on the millimeter-wave transmission properties was analyzed. The results indicate that with the increase of physical thickness, the physical thickness deviation has more influence on millimeter-wave transmission, reflection and absorption properties, the accuracy requirements for physical thickness deviation becomes higher. This article have a certain reference value about the design of IR/MMW frequency divider.

Key words: IR/MMW; physical thickness; thickness deviation

收稿日期:2013-08-10; 修订日期:2013-09-25

基金项目:国家自然科学基金(61235011);国家重大科学仪器设备开发专项资金(2012YQ040164);

天津市科委项目(12JCQN101200, 13JCYBJC17300)

作者简介:刘华松(1980-),男,博士,研究员,主要从事激光薄膜的设计、制备与测试技术的研究。Email:liuhuasong@hotmail.com

0 引言

在光学薄膜领域, SiO₂ 介质材料由于具有较小的热膨胀系数、良好的机械性能、不受强酸腐蚀、耐水和可以使用磨削、抛光技术进行加工等优点, 作为基底材料已广泛应用在可见、红外波段^[1-2]。同时 SiO₂ 介质材料电导率和介电损耗都很小, 即使在高温条件下其电导率与介电损耗也维持在较低水平, 因此 SiO₂ 介质材料是红外/毫米波薄膜的基底的较佳选择。

为了实现红外和毫米波能量有限损耗分离, 文中根据光的干涉原理, 利用毫米波也是电磁波具有较强的似光性, 计算了在毫米波段基底材料的相干厚度。利用电磁波多光束干涉原理, 在考虑基底参与干涉的情况下, 提出了基底厚度选择条件。在容许的基底厚度下, 计算了毫米波在不同厚度 SiO₂ 基底材料上的透射、反射和吸收特性。并且考虑到基底厚度存在加工误差和基底本身介电常数存在测量误差, 对基底材料厚度偏差和介电常数测量误差进行了容差分析, 对红外/毫米波共口径探测器窗口^[3]的设计具有一定的理论指导意义。

1 基本理论

1.1 介质的电磁波干涉理论

电磁波干涉理论最早被 Tomas Yang 发现, 并成为光学波段重要理论基础之一^[2]。经过大量的科学研究证明, 干涉理论也适用于非光学波段^[4-5], 只需满足干涉的基本条件即可。根据相干长度计算公式^[6]:

$$l = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (1)$$

图 1 给出 35 GHz 毫米波的带宽与相干长度之

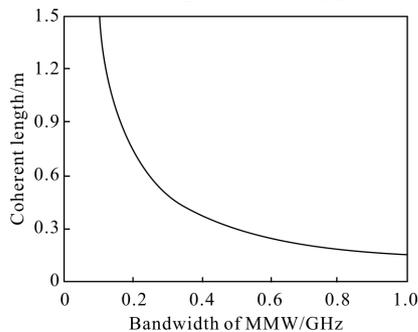


图 1 毫米波带宽与相长度的关系

Fig.1 Relationship between MMW bandwidth and coherent wavelength

间的关系, 毫米波带宽在 300 MHz 以内的情况下, 相关长度大于 0.6 m。

因此, 当介质材料厚度 $ds \ll l$ 时, 毫米波在材料中的传播的特性就可以用干涉现象进行描述, 其透/反射性能可用电磁波多波束干涉理论来表征。

电磁波多束干涉示意图如图 2 所示^[7]。

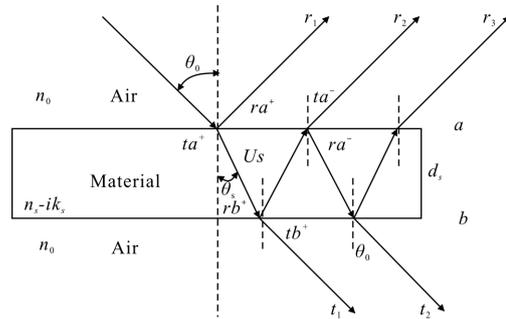


图 2 薄膜的多波束干涉

Fig.2 Thin film multi-beam interference

干涉现象的显著特点是电磁波的振幅叠加而非强度叠加, 因此需从振幅在介质材料表面的透/反射特性进行分析, 获得电磁波干涉强度。如图 2 所示, 假定介质材料的复折射率为 $N_s = n_s - ik_s$, 物理厚度为 d_s , 空气的折射率为 n_0 。当振幅为 E_0 的电磁波入射到介质平板材料表面时, 波束在材料内上下表面多次反射, 因而产生一组反射波束 r_1, r_2, \dots , 和一组透射波束 t_1, t_2, \dots 。入射波束的振幅为 E_0 , 相邻波束间的位相差为 $2\delta (\delta = 2\pi n_s d_s / \lambda$ 为介质材料的位相厚度), 求得反射波束的合振幅 E_R 为:

$$E_R = \sum_{i=1}^{\infty} E_i = \left(r_a^+ + \frac{t_a^+ U_s^2 r_b^+ t_a^- e^{-2j\delta}}{1 - U_s^2 r_b^+ r_a^- e^{-2j\delta}} \right) E_0 = \frac{t_a^+ + U_s^2 r_b^+ e^{-2j\delta}}{1 - U_s^2 r_b^+ r_a^- e^{-2j\delta}} E_0 \quad (2)$$

式中: $r_a^+, r_a^-, r_b^+, r_b^-, t_a^+, t_a^-, t_b^+, t_b^-$ 分别为在两个界面上的反射系数和透射系数。 U_s 为介质材料对入射电磁波振幅透过系数, 与介质材料的消光系数 k_s 有如下关系:

$$U_s = \exp\left(-\frac{2\pi k_s d_s}{\lambda}\right) \quad (3)$$

于是得到多波束干涉的反射系数为:

$$r = \frac{E_R}{E_0} = \frac{r_a^+ + U_s^2 r_b^+ e^{-2j\delta}}{1 - U_s^2 r_b^+ r_a^- e^{-2j\delta}} \quad (4)$$

因此基板的反射率为:

$$R = r \times r^* \quad (5)$$

类似的可以求得介质材料透射波束的和振幅:

$$E_T = \frac{t_a^+ t_b^+ U_s e^{-j\delta}}{1 + r_a^+ U_s^2 r_b^+ e^{-2j\delta}} E_0 \quad (6)$$

得出介质材料的透过率 T 为:

$$T = \left| \frac{E_T}{E_0} \right|^2 \quad (7)$$

上述公式(1)~(7)可以计算毫米波通过介质材料时的透射、反射和吸收特性。

1.2 介质材料的厚度选择

根据 1.1 节中的分析,介质材料的光学厚度与工作波长相匹配时,可以实现干涉相长和干涉相消。如果在工作波长处实现高透射则必须实现相消反射,即公式(4)满足下列关系:

$$\frac{r_a^+ + U_s^2 r_b^+ e^{-2j\delta}}{1 - U_s^2 r_b^+ r_a^+ e^{-2j\delta}} = 0 \quad (8)$$

由于 $r_a^+ = -r_a^-$, $r_a^+ + r_b^+ = 0$, 当 $U_s^2 e^{-2j\delta} = 1$ 时,公式(8)成立。根据公式(3)和位相厚度表达式有:

$$\exp\left(-2j \frac{2\pi(n_s - ik_s)d_s}{\lambda}\right) = 1 \quad (9)$$

因此当满足

$$\left(2 \frac{2\pi(n_s - ik_s)d_s}{\lambda}\right) = 2m\pi \quad (10)$$

m 为正整数时,反射波束干涉相消。

因此介质材料的厚度选择条件为:

$$d_s = \frac{n_s + ik_s}{n_s^2 + k_s^2} \frac{m\lambda}{2} \quad (11)$$

公式(11)说明介质材料厚度的选择与吸收是相关的,下面分析基底的厚度选择极限:入射波束在基底内振幅衰减,如果到达下一界面时波束振幅衰减为零,则可知基底的厚度。即公式(3)满足下式:

$$U_s = \exp\left(-\frac{2\pi k_s d_s}{\lambda}\right) \approx 0 \quad (12)$$

基底厚度为 1~30 mm,消光系数的量级 10^{-5} ~ 10^{-1} 时 U_s 的等高线图如图 3 所示,当材料的消光系数在 10^{-3} 量级以下时,材料厚度可达 30 mm,并且对毫米波的损失在 12.5% 以内。如果消光系数在 10^{-2} 以下,则材料厚度设计必须在 5 mm 以下才能控制毫米波的吸收在 10% 以内。

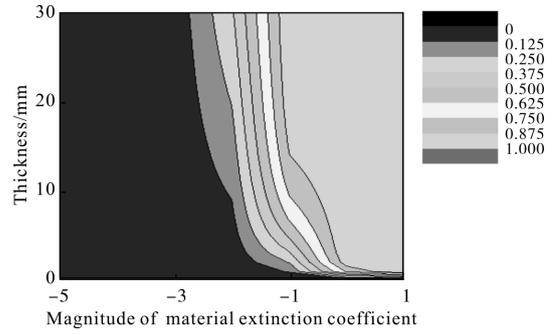


图 3 材料消光系数量级、厚度与吸收等高线图

Fig.3 Contour of magnitude of material extinction coefficient, thickness and absorption

当 k_s 在 10^{-3} 量级以下时,公式(11)可以简化为:

$$d_s = \frac{1}{n_s} \frac{m\lambda}{2} \quad (13)$$

根据公式(13)可以较为精确地选择介质材料的厚度来控制毫米波段的吸收^[8],文中选择 SiO₂ 材料(在 8.5 mm 毫米波处其折射率为 $n_s = 2.037$,消光系数为 $k_s = 1.7 \times 10^{-4}$)分析了材料厚度和介电常数偏差对毫米波波束透射、反射和吸收性能的影响。

2 计算与讨论

2.1 不同物理厚度对毫米波电磁性能的影响

通过 1.2 节中的分析可知,由于 m 取值的不确定性材料物理厚度的设计并不唯一,图 4、图 5、图 6 分别计算了不同物理厚度对毫米波透射、反射和吸收性能的影响。

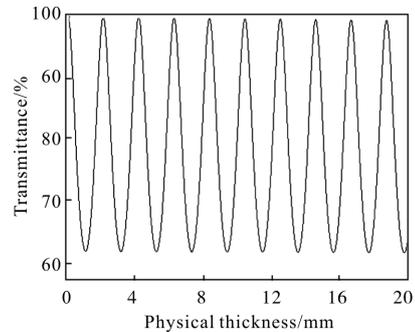


图 4 介质材料厚度对毫米波透射性能的影响

Fig.4 Impact of dielectric material thickness on performance of millimeter-wave transmission

如公式(13)所示,在半波长整数倍对应的物理厚度处出现透射极大值和吸收率极大值。随着介质材料的物理厚度增加,透过率极大值逐渐下降,而吸收

率逐渐增加,反射率的变化并不明显。从三个计算结果分析,材料厚度的增加导致极大透过率下降主要是因为材料的吸收率增加,而不是反射率的增加,因此材料的物理厚度不宜过大。

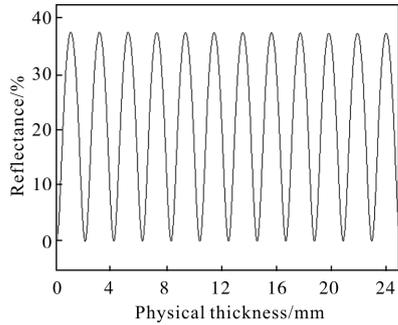


图 5 介质材料厚度对毫米波反射性能的影响

Fig.5 Impact of dielectric material thickness on performance of millimeter-wave reflection

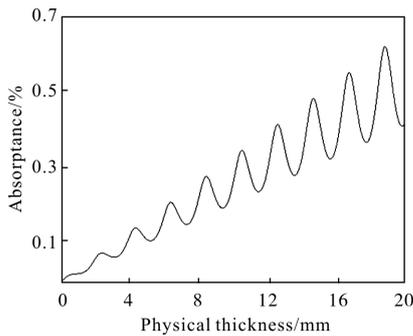


图 6 介质材料厚度对毫米波吸收性能的影响

Fig.6 Impact of dielectric material thickness on performance of millimeter-wave absorption

2.2 物理厚度偏差对毫米波电磁性能的影响

当介质材料的厚度选定后,在实际加工中需要对物理厚度进行控制,其加工误差对毫米波的透/反射性能会产生影响。图 7 为厚度相对变化对应的物

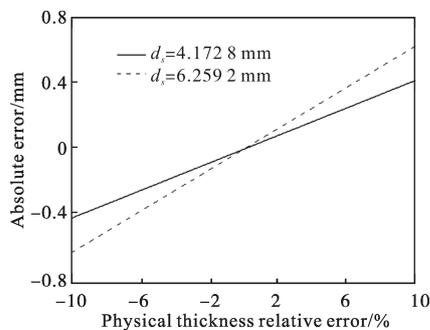


图 7 厚度相对变化对应的物理厚度绝对变化

Fig.7 Thickness relative change corresponds to absolute change

理厚度绝对变化。如果选定的介质厚度分别为 $d_s=4.173 \text{ mm}(m=1)$ 和 $d_s=6.259 \text{ mm}(m=2)$ 时,图 8、图 9 和图 10 分别给出了材料物理厚度发生变化时的毫米波透射/反射和吸收特性的变化。

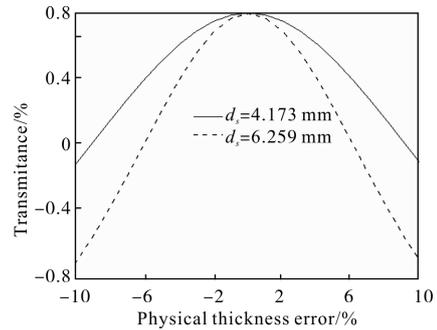


图 8 厚度偏差对毫米波透射率的影响

Fig.8 Impact of thickness deviation on performance of millimeter-wave transmission

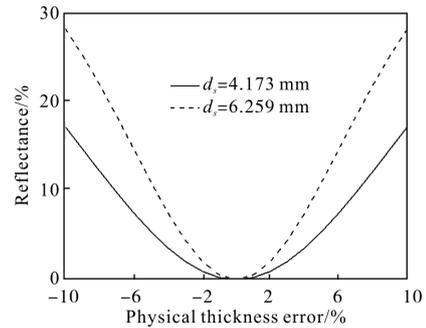


图 9 厚度偏差对毫米波反射率的影响

Fig.9 Impact of thickness deviation on performance of millimeter-wave reflection

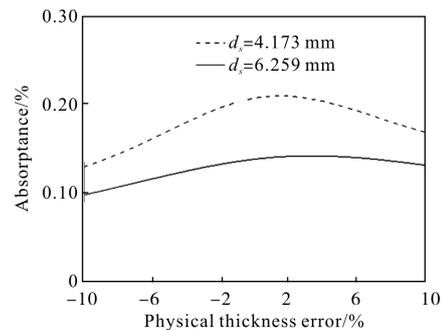


图 10 厚度相对变化对毫米波吸收率的影响

Fig.10 Impact of thickness deviation on performance of millimeter-wave absorption

从图中可以得到两个结论:

(1) 物理厚度的正偏差和负偏差对毫米波的影响是相同的,主要是偏差对反射率的影响占主导地位,导致透射率下降,对吸收率的影响最大,为0.2%。

(2) 初始设计物理厚度越大时,物理厚度的偏差对毫米波的透射性能就越大;

因此,当取初始设计 $d_s=4.173$ mm 时,若要保证毫米波透射率在 90% 以上时,则介质材料的厚度误差就需要控制在 $\pm 7\%$ 以内,绝对误差为 ± 0.292 mm;如果保证毫米波透射率在 98% 以上时,则介质材料的厚度误差就需要控制在 $\pm 2.5\%$ 以内,绝对误差为 ± 0.104 mm;当取初始设计 $d_s=6.259$ mm 时,若要保证毫米波透射率在 90% 以上时,则介质材料的厚度误差就需要控制在 $\pm 4.5\%$ 以内,绝对误差为 ± 0.282 mm;如果保证毫米波透射率在 98% 以上时,则介质材料的厚度误差就需要控制在 $\pm 3\%$ 以内,绝对误差为 ± 0.125 mm。

3 结论

通过理论分析,毫米波在介质材料中的传播可以用多波束干涉原理进行研究,给出了介质材料的厚度设计准则;通过使用数值实验的方法,研究了 SiO₂ 材料的不同物理厚度和物理厚度偏差对毫米波透射、反射和吸收性能的影响。结果表明,介质材料设计厚度越大时,对材料的物理厚度的偏差要求就越高;如果需要严格控制毫米波的透过率,则需要在物理厚度上进行严格控制,保证设计与实际的一致性。

参考文献:

- [1] Fan Youyu, Yang Yi, Jiang Xiongwei, et al. New mid-infrared material and its radar stealth function [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 12-16. (in Chinese)
范有余, 羊毅, 姜雄伟, 等. 一种新型中红外材料及其隐身功能研究[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(1): 12-16.
- [2] Huang Zuxin, Zhao Jianlin, Hu Xiaoyang, et al. Parameters optimized for optical thin film weak absorption testing set-up [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (9): 1779-1783. (in Chinese)
黄祖鑫, 赵建林, 胡晓阳, 等. 光学薄膜弱吸收测试装置参数优化[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1779-1783.
- [3] Li Shizhong, Wang Guohong, Wu Wei, et al. Radar and infrared sensor compound guidance with radar under intermittent -working state [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1405-1410. (in Chinese)
李世忠, 王国宏, 吴巍, 等. 雷达间歇工作下的雷达/红外复合制导跟踪[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1405-1410.
- [4] Mohammed Nurul Afsar. Millimeter -Wave Dielectric Measurement of Materials[J]. *Proceeding of IEEE*, 1985, 73 (1): 131-153.
- [5] Michael Stead, George Simonis. Near millimeter wave characterization of dual mode materials [J]. *Applied Optics*, 1989, 28(10): 1874-1876.
- [6] Liang Quanting. Physical Optic [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 176-189. (in Chinese)
梁铨廷. 物理光学 [M]. 第三版. 北京: 电子工业出版社, 2008: 176-189.
- [7] Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, et al. Modern Optical Thin Film Technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. (in Chinese)
唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
- [8] Ji Yiqin, Liu Huasong, Zhang Yanmin. Test and analysis of optical film constants [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 513-518. (in Chinese)
季一勤, 刘华松, 张艳敏. 光学薄膜常数的测试与分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(5): 513-518.