

文章编号 1004-924X(2006)03-0360-08

倾斜入射条件下衬底对金属网栅屏蔽特性的影响

陆振刚,谭久彬,刘永猛,刘 俭,张 慧

(哈尔滨工业大学 超精密光电仪器工程研究所,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:提出了双层膜系分析方法,该方法采用独立网栅等效薄膜模型,将网栅对衬底干涉的影响引入分析,克服了Kohin方法仅考虑衬底干涉的不精确性,并避免了其分析独立网栅的透波率公式在高频和大入射角时存在的不精确性。用紫外光刻在石英衬底上制备了周期为 $320\ \mu\text{m}$,线宽为 $4.5\ \mu\text{m}$ 的网栅,测得S波 30° 入射时 $12\sim 18\ \text{GHz}$ 的屏蔽效率大于 $16\ \text{dB}$,略低于理论值但变化趋势一致,证实了双层膜法的有效性。进而分析衬底影响表明:入射为S波及小于衬底布儒斯特角 θ_B 的P波时屏蔽效率降低,而入射为大于 θ_B 的P波时屏蔽效率反常增加;屏蔽效率变化最大值随入射角变化;优化衬底厚度可在不影响网栅透光能力的同时获得最佳屏蔽效果。

关键词:电磁屏蔽;透明导电膜;衬底;倾斜入射;金属网栅

中图分类号:TN713;O484.1 **文献标识码:**A

Influence of substrate on shielding effectiveness of metallic mesh under oblique incidence condition

LU Zhen-gang, TAN Jiu-bin, LIU Yong-meng, LIU Jian, ZHANG Hui

(*Institute of Ultra-precision Optoelectronic Instrument Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

Abstract: A double film method was employed to accurately estimate the influence of substrate on shielding effectiveness. By using the equivalent film model of free-standing mesh and preparing a thin mesh film on its substrate, this paper considers its influence on substrate interference to overcome the uncertainty of Konin's method that merely considers the interference of the substrate itself, and to avoid the inaccuracy of Kohin's transmission formulas of free-standing mesh at high frequency and large incident angle. To identify its validity, the metallic mesh with line width of $4.5\ \mu\text{m}$ and period of $320\ \mu\text{m}$ was fabricated on quartz glass by UV-lithography. The measuring results show that the shielding effectiveness is greater than $16\ \text{dB}$ under 30° S-polarized incidence at $12\sim 18\ \text{GHz}$, it is slightly below the theoretical value and has the same change trend with that. The analysis using the new method shows that for S-polarization, the shielding effectiveness decreases with oblique incidence; for P-polarization, it decreases also when incident angle is less than Brewster angle θ_B , but it increases abnormally when incident angle is larger than θ_B , and the largest alteration value varies with incident angle. Optimal shielding effectiveness can be obtained by optimizing substrate thickness without affect

收稿日期:2005-10-10;修订日期:2006-02-06.

基金项目:教育部211工程支持项目

on the transparent property.

Key words: electromagnetic shielding; transparent conducting film; substrate; oblique incidence; metallic mesh

1 引言

金属网栅具有优良的透明导电特性,与其他FSS一样,在从可见光到微波的宽波段都有着广泛的应用^[1],可以作为红外光子晶体滤波器^[2]、毫米波天线反射器^[3]、太赫兹成像系统滤波器^[4]、以及用于微波电磁屏蔽^[5]等,尤其是在光学窗电磁屏蔽方面,因其低频屏蔽能力强,窗口透明度高和耐恶劣环境而备受重视^[6-7]。金属网栅光电特性的传统理论研究方法是等效电路法^[8]及其改进算法^[6,9],因其实现简单,低频分析精度高,现在仍被广泛应用。近年来,电磁场的数值解法如矩量法^[2],FDTD算法^[10]等在网栅分析设计方面也得到了应用,优点是精度高,但实现复杂,运算量极大,一般只用于分析网栅在共振区域的光电特性。对于光学窗的电磁屏蔽,由于干扰波长(微波)比网栅周期大得多,远离网栅共振区域,用等效电路法及其改进算法可以比较精确地分析网栅的屏蔽特性,国内外有很多学者进行了这方面的研究^[6-7,11-13]。

透明衬底使金属网栅具有更好的光电性能,但也影响网栅的屏蔽特性。Kohin^[6]分析了这一问题,但其方法未考虑网栅对衬底干涉的影响,且仅分析了正入射情形,国内的学者^[7,11-13]则还未关注这个问题。随着电磁屏蔽要求的日益提高,准确预测衬底对网栅屏蔽特性的影响已成为网栅设计中的关键问题之一,尤其是作为电磁屏蔽重要情形及曲面器件屏蔽性能分析基础的倾斜入射,还未见有文献深入分析。本文提出的分析任意方向入射情形的双层膜法可对这一问题进行深入研究,该方法采用独立网栅等效薄膜模型,将网栅对衬底干涉的影响引入分析,克服了Kohin方法的不精确性,并避免了其分析独立网栅的透波率公式在高频和大入射角时存在的不准确性。用该双层膜法研究了衬底导致屏蔽效率变化的规律,对Kohin的部分结果进行了有益的探讨和补充,得出对设计网栅有指导意义的结论。

2 平面金属网栅等效电路理论与等效薄膜模型

等效电路理论将网栅用相应的阻抗元件来代替,进而用微波传输线理论来分析其传输特性。网栅依据阻抗特性不同可分为感性网栅和容性网栅。电磁屏蔽多采用有带通功能感性网栅。典型的带透明衬底的感性网栅及其等效电路如图1所

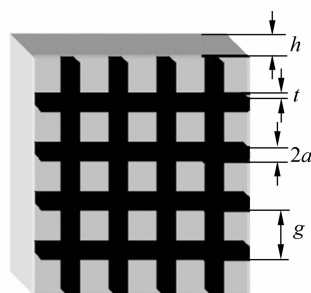


图1(a) 透明衬底感性网栅

Fig. 1(a) Inductive mesh with transparent substrate

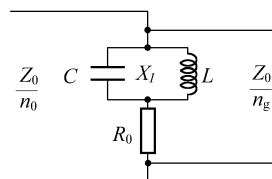


图1(b) 感性网栅等效电路

Fig. 1(b) Equivalent circuit of the inductive mesh

示。网栅结构参数为:周期 g , 线宽 $2a$, 厚度 t , 衬底厚度 h , 衬底的折射率 n_g 。若忽略网栅损耗($R_0=0$), 且当满足 $t \ll \lambda$, $2a \ll g$, $\lambda/g > \max(n_g, n_0)$ 时, 网栅的归一化阻抗为^[9]:

$$\frac{X_I}{Z_0} = - \left(\omega_0' \ln \csc \frac{\pi a}{g} \right) \left(\frac{\omega}{\omega_0'} - \frac{\omega_0'}{\omega} \right)^{-1}, \quad (1)$$

$$\omega_0' = \omega_0 \sqrt{\frac{2}{n_0^2 + n_g^2}}, \quad (2)$$

式中 Z_0 为自由空间阻抗, $\omega = g/\lambda$ 为归一化入射频率, $\omega_0 \approx 1$ 为独立网栅的共振频率。由传输线理论, 可知其透波率为^[9]:

$$T(n_0, n_g) = \frac{4n_0 n_g (X_I/Z_0)^2}{1 + (n_0 + n_g)^2 (X_I/Z_0)^2}, \quad (3)$$

则该网栅的屏蔽效率为:

$$S = -10 \lg T(n_0, n_g), \quad (4)$$

等效电路理论仅适用于电磁波正入射,为把等效电路法推广到任意方向入射情形,Kohin 提出了独立网栅等效薄膜模型并且验证了它的可行性^[6]:满足公式(1)条件的空间独立无损网栅可以由一层等效薄膜代替,由此等效膜求得的透波率与公式(3)在 $n_0 = n_g = 1$ 时的结果相等;薄膜参数为等效折射率 n_e 和等效厚度 d_e ;网栅等效位相厚度必须足够小以避免干涉效应($\delta = 2\pi n_e d_e / \lambda \rightarrow 0$),为此 d_e 取亚纳米量级;等效折射率 n_e 可由网栅结构参数求得^[6]:

$$n_e \approx \lambda \left(\frac{-1}{2\pi g d_e \{ \ln[\sin(\pi a/g)] \}} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

3 双层膜系分析模型

网栅在低频的屏蔽特性与高频的通光特性相互矛盾^[11],其解决方法之一就是在保证一定低的 $2a/g$ 值(获得高的透明区透光率)同时,尽可能的减小线宽 $2a$ 来获得比较高的低频屏蔽效率^[7]。为使光电性能达到使用要求,网栅线宽通常为几个微米,这就要求必须把网栅制作在透明衬底上以增加其刚度。衬底的加入,必然对网栅屏蔽特性造成影响,原因在于电磁波在衬底上下两面反射波的干涉作用^[6],干涉效应发生的(频率)位置和大小影响网栅的屏蔽性能。为准确预测这一影响,本文采用独立网栅等效薄膜模型表征网栅特性,将网栅等效膜与衬底一起构成了如图 2 所示双层膜系,进而用经典薄膜理论分析该双层膜系的屏蔽效率并与独立网栅薄膜相比较,即可准确求出衬底造成的屏蔽效率变化。

假设 S 波以入射角 θ_0 入射图 2 所示的双层膜系。由独立网栅等效膜理论,可求得等效厚度 d_e 和等效折射率 n_e ;衬底厚度 h 与折射率 n_g 是已知量。利用折射定律,很容易求得入射波在各界面的折射角 θ_e 和 θ_g 。根据薄膜理论^[14],可得到入射波在各个分界面的菲涅耳反射系数为:

$$r_{s1} = \frac{n_0 \cos(\theta_0) - n_e \cos(\theta_e)}{n_0 \cos(\theta_0) + n_e \cos(\theta_e)}, \quad (6)$$

$$r_{s2} = \frac{n_e \cos(\theta_e) - n_g \cos(\theta_g)}{n_e \cos(\theta_e) + n_g \cos(\theta_g)}, \quad (7)$$

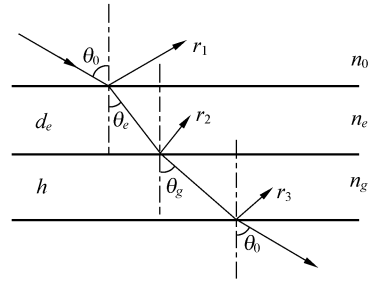


图 2 电磁波在网栅等效膜及衬底传播示意图
Fig. 2 Electromagnetic wave transmitting in the e-equivalent film of mesh and its substrate

$$r_{s3} = \frac{n_g \cos(\theta_g) - n_0 \cos(\theta_0)}{n_g \cos(\theta_g) + n_0 \cos(\theta_0)}, \quad (8)$$

则衬底层的反射系数为:

$$r_{s23} = \frac{r_{s2} + r_{s3} \exp(i\delta_g)}{1 + r_{s2} r_{s3} \exp(i\delta_g)}, \quad (9)$$

该双层膜系的反射系数为:

$$r_{s123} = \frac{r_{s1} + r_{s23} \exp(i\delta_e)}{1 + r_{s1} r_{s23} \exp(i\delta_e)}, \quad (10)$$

其中:

$$\delta_e = \frac{4\pi}{\lambda} n_e d_e \cos(\theta_e), \quad (11)$$

$$\delta_g = \frac{4\pi}{\lambda} n_g h \cos(\theta_g), \quad (12)$$

分别为光束在各膜层中两分界面反射的相邻光束位相差,则带衬底无损网栅的微波屏蔽效率为:

$$S_{S\text{dou}} = -10 \lg(1 - r_{s123} \cdot r_{s123}^*), \quad (13)$$

而对于空间独立网栅:

$$r'_{s2} = \frac{n_e \cos(\theta_e) - n_0 \cos(\theta_0)}{n_e \cos(\theta_e) + n_0 \cos(\theta_0)}, \quad (14)$$

可得其反射系数和屏蔽效率分别为:

$$r_{s12} = \frac{r_{s1} + r'_{s2} \exp(i\delta_e)}{1 + r_{s1} r'_{s2} \exp(i\delta_e)}, \quad (15)$$

$$S_{S\text{free}} = -10 \lg(1 - r_{s12} \cdot r_{s12}^*), \quad (16)$$

则衬底造成的屏蔽效率变化为:

$$\Delta S_S = S_{S\text{free}} - S_{S\text{dou}}, \quad (17)$$

当 P 波倾斜入射时,利用相似的分析方法可得:

$$S_{P\text{dou}} = -10 \lg(1 - r_{p123} \cdot r_{p123}^*), \quad (18)$$

$$S_{P\text{free}} = -10 \lg(1 - r_{p12} \cdot r_{p12}^*), \quad (19)$$

$$\Delta S_P = S_{P\text{free}} - S_{P\text{dou}}, \quad (20)$$

上述各式中仅 λ, θ_0 为变量,利用计算机很容易求得衬底对屏蔽效率的影响式(17)和(20)。由

于该双层膜法考虑了网栅对衬底干涉的影响,因而克服了 Kohin 方法仅考虑衬底干涉的不精确性;而且推导过程从倾斜入射的非涅耳公式出发,因此可以分析任意方向入射情形。该双层膜法是严格推导得到的,其精度主要取决于独立网栅等效膜参数的精度,即依赖网栅等效电抗模型的精度。

4 衬底对网栅屏蔽特性的影响分析

4.1 电磁波倾斜入射条件下衬底导致屏蔽效率的变化规律

一般认为,加入衬底会导致网栅屏蔽效率比相同结构参数的独立网栅降低^[6],因此若能获得准确的降低值并作为提高设计要求的尺度,则既能满足屏蔽要求,又能获得最好的通光特性。此时要以独立网栅倾斜入射的屏蔽效率作为参考值。文献[6]给出倾斜入射时独立网栅的 RF 透波率如下:

$$T_{ms} \cong \frac{4g^2 \cos^2 \theta_0}{\lambda^2} \left[\ln \left(\sin \frac{\pi a}{g} \right) \right]^2, \quad (21)$$

$$T_{mp} \cong \frac{4g^2}{\lambda^2 \cos^2 \theta_0} \left[\ln \left(\sin \frac{\pi a}{g} \right) \right]^2, \quad (22)$$

公式(21)、(22)虽可求出 RF 透波率,进而由公式(4)求出对应的屏蔽效率,但其存在不妥之处。以公式(22)即文献[6]中的公式(14)为例说明。

首先作出多个仿真曲线于图3以便于对比。由图3可见,a、c两个曲线在频率较高时屏蔽效率小于零,即对应的透波率大于1,这在物理意义上是不可能的。其原因在于正入射时,文献[6]中公式(4)(曲线a)实际是 RF 低频时的近似值,不能用于较高的频率;而文献[8]中的公式(1)(曲线b)则不存在近似,高频时可以应用。

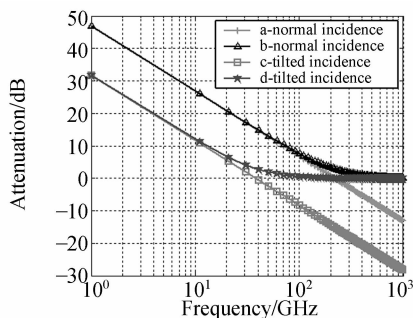


图3 独立网栅在 P 波正入射和 80°入射时的屏蔽效率

Fig. 3 RF attenuation of free-standing mesh under 0° and 80° P-polarization radiation

对于倾斜入射,公式(22)(曲线c)不是严格推导得到的,虽然在低频能得到与实验基本吻合^[6]的结论,但它利用了文献[6]中公式(4)的结论,因此也仅适用于 RF 低频,且入射角不能太大的情况(显然,由公式(22)可知,较大的 θ_0 会使 T_{mp} 大于 1)。因此公式(21)、(22)分析较高入射频率和大入射角度的屏蔽效率是不准确的。曲线 d 在低频与曲线 c 重合,对于较高的频率,没有屏蔽效率小于零的问题。而且,曲线 d 公式(19)与文献[6]的公式(8)(薄膜理论)的结果一致,充分说明用公式(16),(19)替代公式(21),(22)来计算独立网栅任意入射角度及入射频率的 RF 屏蔽效率是准确的和可行的。

下面分析衬底导致的屏蔽效率变化。假设衬底材料和厚度一定,利用前述的双层膜系分析公式(17)、(20)得到不同偏振不同入射角时的屏蔽效率的变化 ΔS 如图 4。首先分析与设计网栅密切相关的屏蔽效率整体变化规律,再研究局部异常区域的特性。

S 波入射如图 4(a)。除波谷附近 ΔS 略小于零,其他区域 ΔS 为正值,说明此时衬底导致屏蔽效率下降,且 ΔS 随入射角和入射频率变化。正入射时 $\Delta S_{\max} \approx 10 \log_{10}(\epsilon_g)$,与文献[6]结果相同;但入射角增大时, ΔS_{\max} 增大。文献[6]认为设计网栅时目标屏蔽效率只需提高 $10 \log_{10}(\epsilon_g)$,通过仿真可以看出,以此要求设计金属网栅,在倾斜入射时满足不了使用要求。

P 波入射,如图 4(b)。当入射角小于衬底与出射介质之间的布儒斯特角 θ_B 时,与 S 波入射的结论相似;但在入射角大于 θ_B 时,除了波峰附近 ΔS 略大于零,其他区域 ΔS 为负值,即屏蔽效率增加。这看起来有些反常:即本应起增透作用的衬底起了增反作用。这种反常现象的原因在于 P 波的特殊菲涅耳反射性质^[14]和网栅等效膜的特殊性:网栅等效折射率值很大(n_e 超过 10^4 量级)且与频率有关,由于 $\tan \theta_{Be} = n_e$,独立网栅薄膜的布儒斯特角 θ_{Be} 几乎等于 90° ,其反射率随入射角的增加(0° 到 90°)而降低;而一般透明材料 n_g 比较小,透明衬底网栅的整体布儒斯特角满足 $\tan \theta_B = n_g$, θ_B 在 60° 附近,反射率在入射角小于 θ_B 时下降,入射角大于 θ_B 时快速上升,且在 θ_B 处反射率的值与独立网栅薄膜的值相等(因为衬底此时对 P 波的反射率为零,对网栅没有影响),因

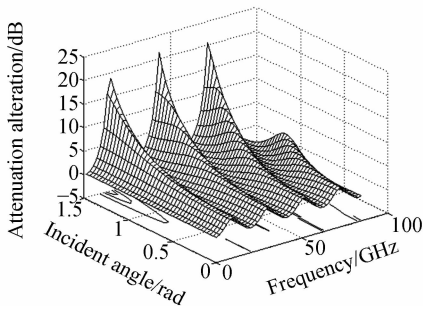


图 4 (a) S 波入射衬底造成微波屏蔽效率的变化
Fig. 4 (a) Alteration on RF attenuation of the mesh from substrate under S-polarized radiation

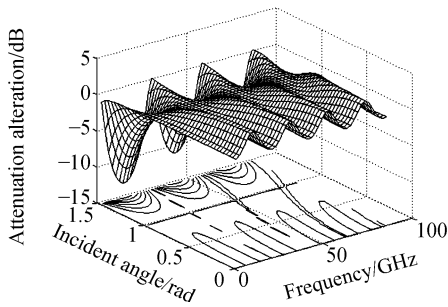


图 4 (b) P 波入射衬底造成微波屏蔽效率的变化
Fig. 4 (b) Alteration on RF attenuation of the mesh from substrate under P-polarized radiation

此在曲线上看到 θ_B (图 4(b) 中约 1 rad 处) 附近有一条等值线, 入射角大于 θ_B 时, 二者之差为负值, 出现了屏蔽效率反常增加。因此文献[6]认为衬底总是造成电磁屏蔽效率下降的结论也不确切, 其原因就在于文献[6]的分析方法忽略了网栅对衬底干涉的影响, 这也充分说明了本文双层膜系分析方法引入网栅特性的必要性。

对于 ΔS 的异常区域, 即 ΔS 本应为零却略小于零 (入射为 S 波及小于衬底布儒斯特角 θ_B 的 P 波的 ΔS 波谷附近)、 ΔS 本应为零却略大于零 (入射为大于 θ_B 的 P 波的 ΔS 波峰附近) 的区域, 异常的原因就在于网栅等效薄膜不是半无穷大介质, 与空间相邻两层有限厚度薄膜的互相影响相似, 它与衬底相互影响 (图 2 所示的双层膜系), 只不过因其位相厚度很小, 使干涉影响也很小, 异常区域的 ΔS 值接近于零, 对网栅的性能和设计都不产生影响, 这也符合网栅等效薄膜理论的条件^[6]。可以说, 这是将网栅特性对衬底干涉的影

响引入分析的必然结果, 但网栅对衬底干涉的影响除了等效位相厚度外, 还有依赖于频率变化的特殊等效折射率, 因此才有前面屏蔽效率变化的整体规律。

图 4 表明, 衬底导致最大屏蔽效率变化 ΔS_{\max} 随入射角和入射频率范围不同而不同, 双层膜系法可以准确预测出 ΔS_{\max} 的方向及大小, 若使其作为提高网栅设计要求的尺度, 即可得到满足使用要求的金属网栅。而且仿真还发现, 其他条件不变而仅减小衬底折射率时, ΔS_{\max} 也随之减小, 这从薄膜干涉理论易于理解。因此网栅要尽量选取折射率小的衬底材料。

通过引入双层膜系分析法, 克服了 Kohin 方法的不精确性, 对倾斜入射条件下衬底对屏蔽效率的影响规律有了清晰的认识, 这对 Kohin 仅适用于正入射的结论是有益的补充, 对网栅设计有重要意义。

4.2 衬底干涉的频移特性与网栅屏蔽效率的优化

衬底导致的最大屏蔽效率变化量由衬底折射率、入射波偏振态、入射角范围和入射频率决定, 但其发生的频率位置随衬底光学厚度改变而改变。

由薄膜干涉理论易知, 电磁波入射图 2 所示膜系时, 发生最大干涉效应的起始频率 (对应第一个干涉峰) 为 $f_{\min} = c_0 / (4n_g h \cos(\theta_g))$, c_0 为真空中光速, 最小的 f_{\min} 出现在正入射时。当 f_{\min} 比需要屏蔽的最高频率 f_{\max} 还高得多时, 不必考虑衬底对屏蔽效率的影响 (如超低频电磁屏蔽), 这相当于降低了电磁屏蔽要求, 有利于提高金属网栅在透明区的透光能力。而对于人们更关心的微波段屏蔽 (尤其是 1~20 GHz 雷达波段), 为保证网栅结构的刚度, 衬底厚度 h 通常取几个毫米以上, 使得 f_{\min} 在 15 GHz 附近或更低, 此时必须考虑衬底干涉的影响。因此文献[6]认为设计网栅时要在所有频率上使设计目标屏蔽效率值提高的结论是不必要的, 是否考虑衬底干涉影响由屏蔽电磁波段决定, 一概提高设计要求会造成屏蔽性能的浪费而牺牲透光性能。

当必须考虑衬底影响时, 调整衬底厚度可以改变衬底对屏蔽效率的影响程度。以 S 波 30° 入射为例, 假设网栅的结构参数、衬底材料都相同, 用双层膜系方法得到不同衬底厚度的微波屏蔽效率曲线如图 5。

仿真结果说明了两个问题:在低频,不同衬底厚度的网栅屏蔽效率曲线趋近于独立网栅,此波段设计网栅不必考虑衬底的影响;而干涉影响区域内,衬底干涉有明显的频移特性,优化衬底厚度可以使 1~20 GHz 最低屏蔽效率值从衬底厚度为 3.0 mm 的 18 dB 提高到厚度为 5.5 mm 的 22 dB,接近独立网栅此波段的最低值。这里仅以石英玻璃衬底为例说明问题,实际若是衬底折射率比较大或者入射角度比较大时,屏蔽效率的提高更为显著。因此在满足刚度和工艺要求的情况下优化调整衬底厚度(材料一定),能在设计屏蔽频率范围内获得最佳的屏蔽效果,而透光能力因网栅结构参数不变而不受影响。

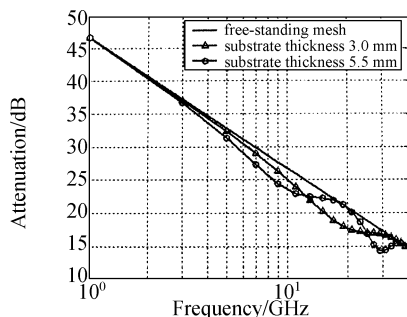


图 5 衬底厚度对网栅屏蔽效率的影响

Fig. 5 Influence of substrate thickness on RF attenuation

5 实验结果及讨论

为了验证本文双层膜方法的有效性,用紫外光刻制作了如下参数的金属网栅: $g = 320 \mu\text{m}$, $2a = 4.5 \mu\text{m}$, $t = 0.45 \mu\text{m}$, 石英衬底厚度 $h = 1 \text{ mm}$;其显微镜下局部图案如图 6 所示。用微波网络分析仪测得以 S 波 30° 入射 12~18 GHz 频段内的屏蔽效率,并与双层膜分析公式(13)进行比较于图 7。可见,整个频段内屏蔽效率实测值大于 16 dB,比理论值略低,但二者变化趋势一致。实验说明本文双层膜法能够很好的分析带衬底网栅在倾斜入射时的屏蔽效率(也包含正入射情况)。

为了获得较好的透光能力,网栅线宽仅为几个微米,这样的独立网栅实际无法加工出来;但独立网栅等效膜模型是由等效电路法得到,其有效性早已得到实验的验证^[6-8]。注意到本文双层膜

法的分析公式推导过程中是分别获得空间独立网栅和有衬底网栅的屏蔽效率,并用他们之差作为衬底造成屏蔽效率变化的。因此只要验证了带衬底网栅屏蔽效率的有效性,并用它减去独立网栅的屏蔽效率,其差值作为衬底对网栅屏蔽效率的影响是可行的,即本文的双层膜法结果可靠,则前一部分用该方法得到的衬底造成的屏蔽效率变化规律及网栅性能优化的结果也是可信的。

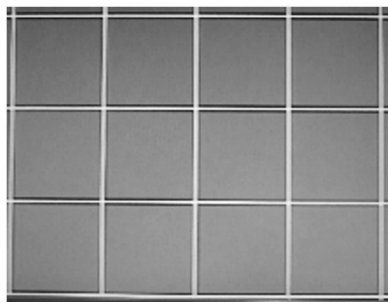


图 6 网栅局部图案在 5 倍显微镜下的图片

Fig. 6 Partial pattern of metallic mesh at $5\times$ microscope

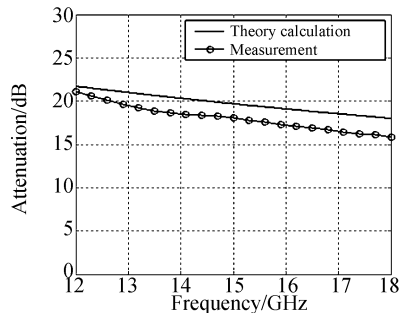


图 7 S 波 30° 入射时屏蔽效率仿真与实测结果比较
Fig. 7 Comparison of theory and measurement on RF attenuation under 30° S-polarization radiation

由图 7 可见,整个频段内,实测结果比仿真结果低约 2 dB,这一方面由于刻蚀中存在钻蚀使实际有效线宽比测量线宽小,金属膜厚度有限和电导率非无穷大,这些都降低了屏蔽效率;另一方面,本文采用的是经由 Whitbourn 修正的等效电抗模型^[9],深入分析和试验研究表明,该模型在研究高通光率网栅透波率时,原理性误差仍然较大,这是实测值比理论值整体偏低的主要原因。作者下一步将尝试提出一种适用于高通光率网栅的新型等效电抗模型,进而可以直接结合本文的双层膜系公式,在分析衬底影响时具有更高的精度。

6 结 论

本文推导了基于独立网栅等效膜模型的双层膜系分析公式来预测倾斜入射时衬底对网栅屏蔽特性的影响,实际加工了金属网栅并测量其屏蔽效率,实测结果仅比理论值略低,但变化趋势一致,验证了该分析方法的有效性。进而深入研究了衬底对网栅屏蔽特性的影响规律并对文献[6]的部分结论进行有益的探讨和补充,得到以下对网栅设计有指导意义的结论:

(1)文献[6]中的分析独立网栅倾斜入射的透过率公式(14)、(15)在高频和大入射角时存在的不准确性,可由本文的公式(16)、(19)代替。

(2)相对于独立网栅,入射为 S 波及小于衬底布鲁斯特角 θ_B 的 P 波时衬底导致屏蔽效率降低,而入射为大于 θ_B 的 P 波时屏蔽效率反常增

加;屏蔽效率变化的最大值直接决定网栅屏蔽特性的设计要求,其值随入射角变化;这些变化规律补充了文献[6]仅适用于正入射的屏蔽效率恒降且最大值恒定的结论。此外,选用折射率较小的衬底材料能减小对屏蔽效率的影响。

(3)衬底光学厚度决定干涉效应出现的起始频率 f_{\min} ,当需屏蔽的最高频率 f_{\max} 低于此频率时,不必考虑衬底的影响,降低了设计要求,有利于提高金属网栅在透明段的透光能力;当 f_{\max} 高于 f_{\min} 时,在满足刚度和工艺要求的情况下,优化衬底厚度值,能够保证透光能力不变而提高整个屏蔽波段的屏蔽效率,使衬底干涉影响最小。

致谢:感谢北京大学微米/纳米加工技术国家重点实验室张大成教授和李婷老师在器件加工方面给予的帮助;感谢北京环境特性研究所(207所)巢增明老师在器件微波透波率测量方面给予的帮助。

参考文献:

- [1] 卢俊,张靓,孙连春. Y形和Y环形单元特性的实验对比研究[J]. 光学精密工程,2005,13(2):219-224.
LU J,ZHANG J,SUN L C. Experimental comparison of the characteristics of Y element and Y loop element[J]. *Optics and Precision Engineering*,2005,13(2):219-224. (in Chinese)
- [2] DRUPP R P,BOSSARD J A,YE Y H. Infrared single-layer metallodielectric photonic crystals[J]. *Applied Physics Letters*,2004,85(10):1835-1837.
- [3] SAULEAU R,COQUET P, et al. Radiation characteristics and performance of millimeter-wave horn-fed Gaussian beam antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*,2003,51(3):378-387.
- [4] DRYSDALE T D,GREGORY I S. Transmittance of a tunable filter at terahertz frequencies[J]. *Applied Physics Letters*,2004,85(22):5173-5175.
- [5] KLEIN C A. Microwave shielding effectiveness of EC-coated dielectric slabs[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*,1990,38(3):321-324.
- [6] KOHIN M,WEIN S J. Analysis and design of transparent conductive coatings and filters[J]. *Optical Engineering*,1993,32(5):911-925.
- [7] 冯晓国,方梁,孙连春. 金属网栅结构参数设计与制作[J]. 光学精密工程,2005,13(1):59-64.
FENG X G,FANG L,SUN L C. Characteristic dimension design and fabrication of metallic mesh[J]. *Optics and Precision Engineering*,2005,13(1):59-64. (in Chinese)
- [8] ULRICH R. Far-infrared properties of metallic mesh and its complementary structure[J]. *Infrared Physics*,1967,7:37-55.
- [9] WHITBOURN L B,COMPTON R C. Equivalent-circuit for metal grid reflectors at a dielectric boundary[J]. *Applied Optics*,1985,24(2):217-220.
- [10] SAULEAU R,COQUET P. Beam focusing using 60 GHz Fabry-Perot resonators with uniform and non-uniform metal grids[J]. *Electronics Letters*,2003,39(4):341-342.
- [11] 高劲松,孙连春,郑宣明,等. 红外透明导电金属网栅薄膜[J]. 光学技术,2001,27(6):558-559.
GAO J S,SUN L C,ZHENG X M, et al. IR transparent conductive metallic mesh film[J]. *Optical Technique*,2001,27(6):558-559. (in Chinese)

- [12] 车英,董连和,王也. 红外增透膜与远红外低通滤波器[J]. 兵工学报,2003,24(1):62-64.
CHE Y,DONG L H,WANG Y. Transparent infrared coatings and far infrared low-pass filter[J]. *Acta Armamentarii*, 2003,24(1):62-64. (in Chinese)
- [13] 李凤友,卢振武,谢永军,等. 激光直写方法制作透明导电金属网栅[J]. 光子学报,2002,31(10):1270-1272.
LI F Y,LU Z W,XIE Y J,*et al.* Transparent conductive metallic film mesh fabricated by laser direct writing techniques[J]. *Acta Photonica Sinica*,2002,31(10): 1270-1272. (in Chinese)
- [14] 梁铨廷. 物理光学[M]. 北京:机械工业出版社,1987.
LIANG Q Y. *Physical Optics*[M]. Beijing: China Machine Press,1987. (in Chinese)

作者简介:陆振刚(1978—),男,哈尔滨工业大学博士研究生,主要研究方向为光学窗电磁屏蔽、电磁场数值计算及衍射光学元件设计;Email:lzgot@163.com

谭久彬(1955—),男,博士,教授,博士生导师,现任哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所所长、中国计量测试学会副理事长、中国计量测试学会计量仪器专业委员会主任委员、国际测量与仪器委员会委员、中国仪器仪表学会理事等职务,主要研究方向为超精密测量技术与仪器工程、光机电一体化技术等。