

文章编号 1004-924X(2006)06-0949-06

高通光率金属网栅屏蔽效率分析的等效折射率模型

陆振刚, 谭久彬, 金 鹏, 刘 俭

(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: 基于 Ulrich 半实验方法、LZ 等效电抗模型和 Kohin 等效膜方法, 建立了一种新型的高通光率金属网栅屏蔽效率分析的等效折射率模型。该模型精确地建立了金属网栅的等效折射率与其结构参数和边界材料折射率的关系, 便于分析电磁波任意入射方向时的金属网栅屏蔽效率, 并可克服 Chen 倾斜模型在分析高通光率金属网栅屏蔽效率时的失效问题。为验证建立模型的有效性, 用紫外光刻法制备了周期 $320\ \mu\text{m}$ 、线宽 $4.5\ \mu\text{m}$ 和周期 $160\ \mu\text{m}$ 、线宽 $5.5\ \mu\text{m}$ 的两种网栅, 并用微波网络分析仪测试了 $12\sim 18\ \text{GHz}$ 波段的屏蔽效率。实验与分析表明: 建立的新模型的原理计算误差 $< 2\ \text{dB}$, 优于 Chen 模型和 LZ 模型的 $8\ \text{dB}$ 的原理计算误差和 Ulrich 模型的 $4\ \text{dB}$ 的原理计算误差, 说明新模型能更精确地分析高通光率金属网栅的屏蔽效率。

关键词: 电磁屏蔽; 等效折射率模型; 高通光率; 金属网栅

中图分类号: O441.4; TN973.32 **文献标识码:** A

Equivalent refractive index model on shielding effectiveness analysis of high transparency metallic mesh

LU Zhen-gang, TAN Jiu-bin, JIN Peng, LIU Jian

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

Abstract: A novel equivalent refractive index model of high transparency metallic mesh was proposed to calculate its shielding effectiveness accurately. Based on Ulrich's empirical method, LZ's equivalent reactance model and Kohin's equivalent film method, the model accurately established the relation among mesh equivalent refractive index, structural parameters and dielectric boundary refractive indexes so that it is easy to calculate the mesh shielding effectiveness under various incident angles and to prevent the invalidation of Chen's formulas about oblique incidence on high transparency. To identify the new model's validity, two kinds of metallic meshes in period of $160\ \mu\text{m}$, line width of $5.5\ \mu\text{m}$ and period of $320\ \mu\text{m}$, line width of $4.5\ \mu\text{m}$ were fabricated using UV-lithography, and the shielding effectiveness were measured by microwave network analyzer at $12\sim 18\ \text{GHz}$. Experiment and analysis show that the new model's theoretical calculation error is less than $2\ \text{dB}$, more accurately than $4\ \text{dB}$ of Ulrich's model and $8\ \text{dB}$ of Chen's and LZ's models.

Key words: electromagnetic shielding; equivalent refractive index model; high transparency; metallic mesh

收稿日期: 2006-03-07; 修订日期: 2006-05-12.

基金项目: 教育部 211 工程支持项目

1 引言

金属网栅具有透明导电功能,在光学窗电磁屏蔽方面有着广泛应用^[1-2],如空间飞行器窗口防空间辐射,核磁共振仪的观察窗电磁屏蔽等。等效电路法是金属网栅光电透波特性分析的常用方法,对于二维方格金属网栅,主要有三种分析模型:Ulrich 模型^[3-4],Chen 模型^[5]和 LZ 模型^[6]。这些模型主要被用来研究金属网栅共振频率($\omega_0 = g/\lambda \approx 1$)附近的透波特性(特别是 $\omega = 0.1 \sim 1$),有多位学者对这一区域内传统等效电路模型的有效性和精度进行了严格的矢量分析和实验研究^[6-8],结果表明 Chen 和 LZ 的模型较 Ulrich 模型精确,更加接近矢量解和实测值。

随着加工工艺水平的不断提高,高通光率金属网栅的最小线宽已可达到几个微米,周期为几百微米,其共振频率可达到 1 000 GHz 或更高。从电磁屏蔽角度看,人们更关心 < 100 GHz ($\omega < 0.1$),特别是 20 GHz 以内的微波段的屏蔽性能,对此波段屏蔽效率的快速高精度分析成为高通光率金属网栅设计的关键问题之一。传统等效电路模型具有快速计算的优势,但由于屏蔽波段远低于网栅共振频率,其精度和有效性需要验证。为深入研究这一问题,用紫外光刻在石英衬底上制备了结构参数不同的两种金属网栅,对其在 12~18 GHz 波段的屏蔽效率进行了测试并与三种传统等效电路模型进行比较。结果表明,尽管共振区域 Chen 模型和 LZ 模型较为精确,但它们在低频区计算误差达 8 dB;Ulrich 模型虽较为精确,但计算误差仍达 4 dB。为保留等效电路模型快速计算的优势并提高其分析精度,本文提出了一种新型的金属网栅等效折射率模型:基于 Ulrich 半实验方法和 LZ 等效电抗模型,得到改进的网栅等效电抗,进而利用 Kohin 的等效膜方法,并考虑网栅吸收损耗和不同绝缘边界的影响,将网栅的等效折射率与其结构参数和边界材料折射率的关系精确地建立起来。实验表明,建立的新模型在分析高通光率金属网栅屏蔽效率时原理计算误差小于 2 dB,优于传统模型,且新模型便于分析电磁波任意入射情况,并可克服 Chen 倾斜模型此时的失效问题。

2 用传统等效电路模型分析高通光率金属网栅屏蔽效率的精度比较与实验验证

等效电路模型是分析金属网栅入射频率低于共振频率时透波特性的常用模型,虽然没有矢量分析方法精确,但其实现简单、计算速度快、可分析的频率范围宽,特别适合网栅低频屏蔽特性的快速分析,在网栅的优化设计和参数学习方面具有优势^[7]。二维方格金属网栅是光学窗电磁屏蔽常用结构,如图 1 所示,结构参数为:周期 g ,线宽 $2a$,金属膜厚度 t 。其透波特性分析的常用等效电路模型有三种:Ulrich 模型^[3-4],Chen 模型^[5],LZ 模型^[6]。对于它们在共振区域附近($\omega = 0.1 \sim 1$)的分析精度,已有较多的研究工作。Lee 等人将这三种模型与模匹配法的精确解进行了比较^[6],发现 Chen 和 LZ 的模型的结果非常接近,与精确解相当(文献[6]图 4),而 Ulrich 模型精度较差,如 $\omega = 0.5$ 时,Chen、LZ 模型计算得到的能量透波率都约为 0.34,而 Ulrich 模型约为 0.54。Sauleau 通过 FDTD 的严格分析和实验^[7],也证明了类似的结论:共振频率附近,Chen 和 LZ 具有比 Ulrich 模型更高的精度,它们能够简单地估计出共振频率附近的网栅透波特性。当然进一步研究也表明,若要获得更精确的结果,最好利用矢量分析方法(如 FDTD)或者极为复杂的修正等效电路模型^[8],但这又失去了快速计算的优势。

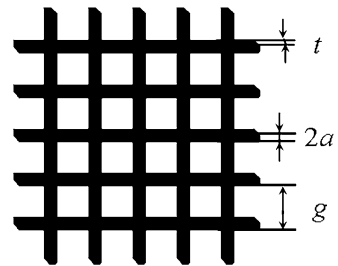


图 1 二维方格金属网栅

Fig. 1 2D metallic mesh with square symmetry

如文献[6]图 4,当 $\omega < 0.1$ 时,上述三种模型得到的透波率都趋近于零,从透明性的角度看,人

们更加关心的是透波的中心频率和带宽特性,如此小的透波率(<0.1)已经没有意义,而 10 dB 的电磁屏蔽效率也满足一般的工程要求^[9]。但随着电磁屏蔽要求的日益提高,有些场合已需要 20 dB 或更高的屏蔽效率^[10];特别是随着最小加工线宽的提高,高通光率金属网栅的共振频率已达太赫频率,其低频区域($\omega < 0.1$)屏蔽效率的快速高精度分析日益引起人们的关注,验证传统等效电路模型在此区域的分析精度和有效性十分必要。

为深入研究这一问题,采用电子束直写制作掩模,用紫外光刻法在石英玻璃衬底上制备了两种结构参数的金属网栅元件,元件 1: $g_1 = 160 \mu\text{m}$, $2a_1 = 5.5 \mu\text{m}$; 元件 2: $g_2 = 320 \mu\text{m}$, $2a_2 = 4.5 \mu\text{m}$ 。利用微波网络分析仪和聚焦天线透镜组成的测试系统,对 12~18 GHz 电磁波垂直入射时网栅的屏蔽效率进行了测试,所测数据与相同结构参数的三种等效电路模型的计算结果进行比较,如图 2、图 3。

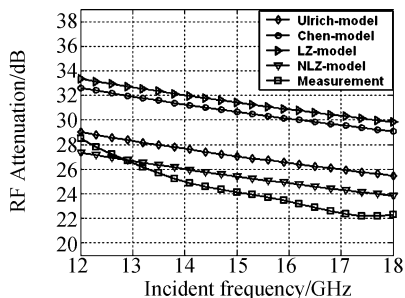


图 2 元件 1 实测结果与等效电路模型结果比较

Fig. 2 Comparison of measurements with equivalent circuit models of element 1

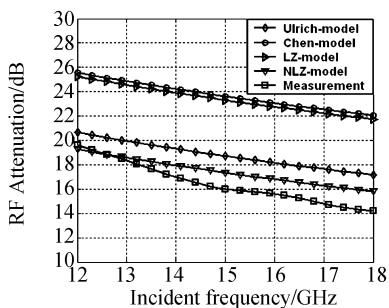


图 3 元件 2 实测结果与等效电路模型结果比较

Fig. 3 Comparison of measurements with equivalent circuit models of element 2

比较计算结果与实测结果,Chen 模型和 LZ 模型曲线非常接近,这是由于他们都是由 Chen 的模匹配法得到的,但它们相对于实测结果计算误差达 8 dB,精度较差。Ulrich 模型曲线较接近于实测曲线,这是因为 Ulrich 模型本身就是来源于实验的半经验公式^[3-4];但对比实测结果,Ulrich 模型的计算误差仍达到 4 dB。这里固有加工过程中钻蚀造成的有效线宽降低以及非理想导体和金属厚度有限等影响,但 Ulrich 模型的获得本身就是以实验为基础的,已经包含了部分影响因素。分析 Ulrich 模型的数据来源^[3],发现其各组金属网栅中最高透光率为 82%,最小加工线宽为 27 μm ,而且金属膜厚度超过 5 μm ;而现在要求的金属网栅向高通光率(要求总的透光率大于 95%)与深度电磁屏蔽(屏蔽效率至少大于 20 dB)方向发展,随着加工技术的进步,现在最小线宽可以达到几个 μm ,金属膜厚度也仅为几百 nm (如本文加工的网栅);这些网栅结构参数与 Ulrich 得到半经验公式的网栅结构参数有了很大的差别,因此用 Ulrich 模型分析必然会带来一定的误差。总之,传统等效电路模拟不能满足高通光率金属网栅屏蔽效率的高精度分析。

3 基于改进的 LZ 等效电抗模型的新型等效折射率模型

3.1 LZ 等效电抗模型的改进

Chen 模型和 LZ 的模型由于没有进行改进和完善,在低频屏蔽特性计算上有较大的误差,但它们计算共振区域透波特性时比较精确,特别是 LZ 模型,形式特别简单;Ulrich 模型由于数据来源在网栅结构参数上的不同,也不适合精确分析高通光率小线宽的网栅结构,但 Ulrich 由实验数据得到的等效电路模型的半实验方法给出了一种获得更加精确模型的方法,即由实验数据来改进已有的模型。在 LZ 模型^[6]基础上,以电磁波垂直入射时的实测数据为依据进行拟合,得到改进的二维方格金属网栅等效电抗模型:

$$\frac{X_{\text{NLZ}}(\omega)}{Z_0} = \frac{-\ln \csc\left(\frac{\pi a}{2g}\right)}{\left(\frac{g}{g-2a} + \frac{1}{2}\omega^2\right)} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{LZ}}} - \frac{\omega_{\text{LZ}}}{\omega}\right)^{-1}, \quad (1)$$

其中 $\omega_{\text{LZ}} = 1 - 0.41a/g$ 为网栅的共振频率。将该

电抗模型得到的计算结果也示于图 2、图 3(标记为 NLZ-model), 可见该模型的计算误差小于 2 dB, 明显小于三种传统等效电路模型, 因而能更精确地计算网栅低频屏蔽效率。下面将进一步把该模型推广到电磁波任意方向入射情况, 并验证其有效性。

3.2 适于分析电磁波任意方向入射时金属网栅屏蔽效率的新型等效折射率模型

必须指出, 等效电路模型只适用于电磁波垂直入射, 为了分析倾斜入射情况, 虽然也可得出不同角度入射的相应模型, 但结果极为复杂且没有通用性。为了简化问题, Chen 给出了分析倾斜入射时网栅的透波率经验公式^[5]:

$$T_s = -20 \log |\tau_0(\omega) [\cos(\theta)]^{2(1-p)}|, \quad (2)$$

$$T_p = -20 \log |\tau_0(\omega) [\cos(\theta)]^{-1.5(1-p)}|. \quad (3)$$

其中 $\tau_0(\omega)$ 为垂直入射时金属网栅的透射系数, 可由等效电路公式结合传输线理论得到, θ 为任意入射角度, $p = (1 - 2a/g)^2$ 为方格网栅孔隙率。该公式在通光率不是太大时可以达到较高的精度^[5], 但将此公式应用于高通光率网栅时, 但在通光率较高时失效(见本文 3.3 部分), 因此在倾斜入射条件下, 需要更加有效的网栅屏蔽特性高精度分析方法。

分析倾斜入射的最好方法是矢量分析法(模匹配法, FDTD 法等), 分析精度高, 但其计算过程复杂, 非常耗时, 不能实现快速计算。Kohin 基于 Ulrich 的等效电路模型, 发展了一种等效薄膜法使等效电路模型能够应用到电磁波倾斜入射情况, 且已得到了实验验证^[11]可发挥等效电路法快速计算的优势, 但前已述及, Ulrich 模型在分析高通光率金属网栅屏蔽效率时也有较大的误差, 且 Kohin 的推导过程没有考虑网栅吸收损耗的影响和网栅两侧折射率不同的情况(典型的是有衬底

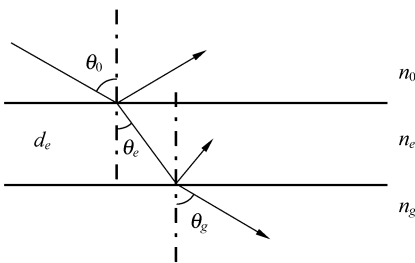


图 4 电磁波在不同绝缘边界间薄膜的传播

Fig. 4 Electromagnetic wave transmitting in film with different dielectric boundaries

的情况)。基于此, 利用改进的 LZ 等效电抗模型, 并考虑了网栅的吸收损耗和边界材料折射率的影响, 推导了一种新型的网栅等效折射率模型, 其过程如下:

假设金属网栅在低频时可等效为一层薄膜, 表征为等效折射率 n_e 和等效厚度 d_e , 它的两侧是折射率分别为 n_0 和 n_g 的介质边界, 如图 4。为使等效膜造成的干涉效应足够小而不影响计算精度^[11], d_e 需取较小的数值, 如 0.01 nm。

首先利用薄膜理论推导出该单层等效薄膜在正入射时的透波率为:

$$T = \frac{8n_0n_g}{A - B\cos(4\pi n_e d_e/\lambda)}, \quad (4)$$

其中:

$$A = n_e^4 + n_g^2(n_0^2 + n_g^2 + 4n_0n_g) + n_0^2n_g^2, \quad (5)$$

$$B = n_e^4 - n_g^2(n_0^2 + n_g^2) + n_0^2n_g^2. \quad (6)$$

依据传输线理论, 具有不同(材料)绝缘边界的金属网栅的透波率为^[4]:

$$T(n_0, n_g) = \frac{4n_0n_g[(R_0/Z_0)^2 + (X/Z_0)^2]}{C + (n_g + n_0)^2(X/Z_0)^2}, \quad (7)$$

其中:

$$C = [1 + (n_0 + n_g)R_0/Z_0]^2, \quad (8)$$

$$\frac{R_0}{Z_0} = \sqrt{\frac{\pi\epsilon_0 c}{\lambda\sigma}} \frac{g}{2a}. \quad (9)$$

R_0/Z_0 为网栅的等效阻抗(表征吸收损耗), 其中 ϵ_0 为真空介电常数, c 为光速, λ 为入射波长, σ 为制作网栅的金属的直流电导率。由于低频时网栅与其等效膜完全等效, 则令: $T(n_0, n_g) = T$, 解得:

$$n_e = \sqrt{\frac{1}{2} [D + \sqrt{D^2 - 4(n_0^2n_g^2 - E)}]}, \quad (10)$$

其中:

$$D = (n_0^2 + n_g^2), \quad (11)$$

$$E = \frac{1 + 2(n_0 + n_g)(R_0/Z_0)}{[(X/Z_0)^2 + (R_0/Z_0)^2](2\pi d_e/\lambda)^2}. \quad (12)$$

将改进的网栅电抗 X_{NLZ} (公式(1))带入公式(10)即得到新型等效折射率模型, 它建立了金属网栅等效折射率与其结构参数和边界材料折射率之间的精确关系, 将其按薄膜理论在倾斜入射时作相应的导纳变换^[12], 就可以将其应用推广到电磁波任意方向入射时网栅屏蔽效率的分析。

3.3 新型等效折射率模型的实验验证与讨论

为了验证新型等效折射率模型的精度, 将其与 Chen 的倾斜公式(2)、(3), Kohin 的等效折射

率公式(文献[11]的公式(10)),以及倾斜入射的实测结果进行比较,计算中考虑了金属膜厚度的影响^[4],结果如图 5~7。可见倾斜入射时,与实测数据相比,Chen 模型计算误差超过 6 dB, Kohin 模型的计算误差超过 2 dB,而新等效折射率模型的计算误差在 1 dB 以内。实验证实了新模型在倾斜情况下可精确分析金属网栅的低频屏蔽效率。

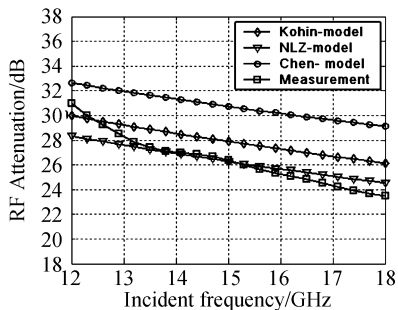


图 5 元件 1 在 s 波 30° 入射时屏蔽效率

Fig. 5 RF attenuation under 30° s-polarization radiation of element 1

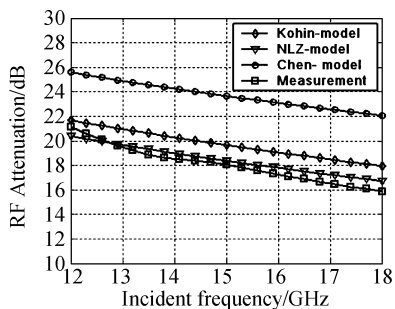


图 6 元件 2 在 s 波 30° 入射时屏蔽效率

Fig. 6 RF attenuation under 30° s-polarization radiation of element 2

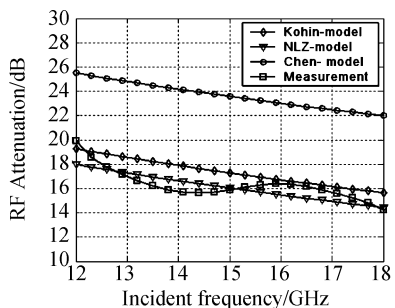


图 7 元件 2 在 p 波 30° 入射时屏蔽效率

Fig. 7 RF attenuation under 30° p-polarization radiation of element 2

对于元件 1,由图 2、图 5 可知,Chen 的倾斜模型结果不仅与实测结果相比误差较大,且在入射角度变化时,仿真结果几乎没有变化(变化小于 0.1 dB),但实测结果变化明显(约 2 dB);对于元件 2,图 3、图 6、图 7 也有类似的结果;说明对高通光率小线宽的金属网栅,Chen 的分析模型是失效的。而新模型则能够较精确地反映因入射角度变化导致的屏蔽效率变化,即新模型可以分析任意方向入射情况,且能够克服 Chen 的倾斜模型在分析高通光率小线宽网栅屏蔽效率的失效问题。

但需注意,新模型较适合分析网栅的低频屏蔽效率($\omega < 0.1$),当研究共振频率附近的透波特性时,仍要应用 Chen 或者 LZ 的模型(或者精确的矢量解法)。但它们作为近似算法并不矛盾,因为分析问题的角度不同;共振频率附近,透波率较大,屏蔽效率很小,研究透波率有意义(实际上人们正是要利用这一频率附近的透波特性);低频时,屏蔽效率较大,透波率较小,研究屏蔽效率有意义(人们更关注低频的屏蔽效率而非透波特性)。这一点希望引起读者的注意。

4 结 论

从实验角度出发,验证了传统等效电路模型分析高通光率金属网栅低频屏蔽效率的精度和有效性,结果表明:尽管 Chen 模型和 LZ 模型在共振频率附近精度较高,但其计算低频屏蔽效率时误差较大,达到 8 dB;Ulrich 模型精度较高,但仍有 4 dB 的误差。

基于 LZ 的模型,从 Ulrich 等效电路半实验公式获得的角度出发,得到一种改进的金属网栅等效电抗模型;进而采用 Kohin 等效膜方法,并考虑网栅吸收损耗和不同绝缘边界材料折射率的影响,建立了新型金属网栅等效折射率模型。该模型可以分析电磁波任意方向入射时网栅的低频屏蔽效率,且能够克服 Chen 倾斜模型分析高通光率小线宽金属网栅屏蔽效率的失效问题。

用紫外光刻制备了两种金属网栅并测试了它们的屏蔽效率,实验证实新建立的等效折射率模型具有较高的分析精度,原理计算误差小于 2dB,优于传统等效电路模型。新模型可作为高通光率金属网栅在电磁波任意方向入射时屏蔽效率的快

速高精度分析方法。

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

面给予的帮助和有益讨论;感谢北京环境特性研究所巢增明老师在器件微波透波率测试方面给予的帮助。

参考文献:

- [1] 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].*Opt. Precis. Eng.*,2005,13(1):59-64. (in Chinese)
- [2] 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 ZH W,XIE Y J,*et al.* Transparent conductive metallic film mesh fabricated by laser direct writing techniques[J].*Acta Photonica Sin.*,2002,31(10):1270-1272. (in Chinese)
- [3] ULRICH R. Far-infrared properties of metallic mesh and its complementary structure[J].*Infrared Phys.*,1967,7:37-55.
- [4] WHITBOURN L B,COMPTON R C. Equivalent-circuit for metal grid reflectors at a dielectric boundary[J].*Appl. Opt.*,1985,24(2):217-220.
- [5] CHEN C C. Transmission of microwave through perforated flat plates of finite thickness[J].*IEEE T. Microwave Theor. Tech.*,1973,21(1):1-6.
- [6] LEE S W,ZARRILLO G,LAW C L. Simple formulas for transmission through periodic metal grids or plates[J].*IEEE T. Anten. Propag.*,1982,30(5):904-909.
- [7] SAULEAU R,COQUET P. Study of Fabry-Perot cavities with metal mesh mirrors using equivalent circuit models: comparison with experimental results in the 60 GHz band[J].*In. J. Infrared Milli.*,1998,19(12):1693-1790.
- [8] SAULEAU R,COQUET P. Validity and accuracy of equivalent circuit models of passive inductive meshes; definition of a novel model for 2D grids[J].*Int. J. Infrared Mill.*,2002,23(3):475-498.
- [9] 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 CH,ZHENG X M,*et al.* IR transparent conductive metallic mesh film[J].*Opt. Tech.*,2001,27(6):558-559. (in Chinese)
- [10] 王海青.电磁辐射环境研究[J].航空电子技术.2001,32(1):29-34.
WANG H Q. Research on environment of electromagnetic radiation[J].*Avionics Tech.*,2001,32(1):29-34. (in Chinese)
- [11] KOHIN M,WEIN S J. Analysis and design of transparent conductive coatings and filters[J].*Opt. Eng.*,1993,32(5):911-925.
- [12] 梁铨延.物理光学[M].北京:机械工业出版社,1987.
LIANG Q Y. *Physical optics second edition*[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。E-mail: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。