

金属表面热红外偏振特性的模型研究

汪 震^{1,2}

(¹ 深圳先进技术研究院 生物医学与健康工程研究所, 广东 深圳 518067)
(² 中国科学院生物医学信息与健康工程学重点实验室, 广东 深圳 518067)

摘要 对金属表面热红外偏振特性的模型进行了研究,在建模中不仅考虑了金属表面的统计特性,也考虑了特别粗糙的金属表面存在的遮蔽效应问题。通过计算机模拟出不同表面粗糙度的金属板热红外偏振度和金属表面热红外辐射角之间的关系曲线,并和实验获得的结果进行了对比。对于表面粗糙度为 $1.6 \mu\text{m}$ 的较为光滑的金属表面,模拟的结果基本吻合了实验中获得的数据。对于表面粗糙度为 $6.8 \mu\text{m}$ 的较为粗糙的金属表面,仿真出的结果和实验中获得的数据相差较大。但在考虑了遮蔽效应后,模型模拟的结果得到了很大的改善。通过对模型的研究,分析确定了对金属板表面热红外偏振度影响的主要因素。

关键词 红外; 模拟; 偏振; 金属

中图分类号 O436.3; TN219

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20092903.0707

Model of Polarized Thermal Emission from Rough Metal Surface

Wang Zhen^{1,2}

¹ Institute of Biomedical and Health Engineering, Shenzhen Institute of Advanced Technology, Shenzhen, Guangdong 518067, China

² Key Laboratory for Biomedical Informatics and Health Engineering, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, Guangdong 518067, China

Abstract The model of thermal infrared polarization properties of the metal surface was discussed. The statistic properties were considered in this model as well the surface shadowing effect. The relation between thermal infrared polarization and irradiation angle is simulated for different surface roughness. The simulation results of smooth metal surface with roughness of $1.6 \mu\text{m}$ accord with the experimental data very well, but the simulation results of rough metal surface with roughness of $6.8 \mu\text{m}$ disaccord with the experimental data. After the shadowing effect of the rough metal surface is considered, the simulation results is improved greatly. The main related factors to determine the thermal polarization properties of the metal surface were discussed.

Key words infrared; simulation; polarization; metal

1 引 言

热红外偏振探测是完全的被动探测,所以其特别适合应用于军事领域^[1,2],对于涂了红外伪装漆的金属板和红外伪装网也有很好的识别能力^[3~4]。正因为上述的优点,热红外偏振探测的研究才越来越被人们重视。大量的实验研究表明金属表面粗糙度是影响金属热红外偏振特性的重要因素^[5~7]。另外目标不同角度的热辐射体现的热红外偏振特性也有着明显的差距^[8~9],因此探测器观测角度的选取对于目标识别效果也很重要。

为了全面准确地描述金属目标表面的偏振特性,研究金属目标表面偏振特性的模型就很重要。Oscar Sandus 提出了理想光滑的金属表面的热红外偏振特性模型^[10]。但是即使是人为加工的光滑金属表面和理想光滑的表面也有很大差别,因此在建模中要充分考虑粗糙表面的实际情况。Aristide 通过仿真研究了不同金属表面的粗糙程度对偏振度的影响。其模型中对于金属表面的粗糙度模型主要考虑的是微粗糙度 RMS 和相关长度 L 两个指标^[11]。Jordan 得出影响粗糙金属表面偏振特性的主要因素

收稿日期: 2008-06-05; 收到修改稿日期: 2008-08-19

作者简介: 汪 震(1976-),男,博士,助理研究员,主要从事偏振探测技术和高光谱成像技术研究。

E-mail: zhen.wang@siat.ac.cn

是微表面的倾斜角度^[12]。David 使用了一种双参数的 hyper-Cauchy 分布函数模拟了粗糙金属表面的偏振特性并和其实验结果进行了比较^[13]。从这些研究可以看出,粗糙金属表面的热辐射偏振特性与其表面特性参数之间关系的模型还没有形成严格的理论基础。

本文通过实验方法探测出已知表面粗糙度的金属铝板的热红外偏振特性,并试图通过模型仿真的方法解释所获得的实验结果。在理论建模研究中考虑了粗糙金属表面的统计特性,同时也考虑了遮蔽效应(shadowing effect)对粗糙金属表面热红外偏振特性的影响。模型的仿真获得了和实验数据较为一致的结果。

2 热红外偏振的理论模型

2.1 理想金属表面的模型

根据能量守恒定律可知,金属的吸收率 a , 反射

率 ρ 和透射率 τ 之间的关系为

$$a(\lambda, T, \theta) + \rho(\lambda, T, \theta) + \tau(\lambda, T, \theta) = 1, \quad (1)$$

式中 λ 为波长, θ 为观察角, T 为温度当对于不透明物体辐射,透射率 $\tau=0$,所以发射率 ϵ 可以写为

$$\epsilon(\lambda, T, \theta) = a(\lambda, T, \theta) = 1 - \rho(\lambda, T, \theta). \quad (2)$$

根据玻恩-沃耳夫相干矩阵的描述方式:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_{pp} & J_{ps} \\ J_{sp} & J_{ss} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle E_p E_p^* \rangle & \langle E_p E_s^* \rangle \\ \langle E_s E_p^* \rangle & \langle E_s E_s^* \rangle \end{bmatrix} = \left(\frac{1}{2 - \rho_{//} - \rho_{\perp}} \right) \|E\|^2 \begin{bmatrix} 1 - \rho_{//} & 0 \\ 0 & 1 - \rho_{\perp} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

所以偏振度 P 可以写为

$$P = \frac{\sqrt{(J_{pp} - J_{ss})^2 + 4J_{ps}^2}}{J_{pp} + J_{ss}} = \frac{\rho_{\perp} - \rho_{//}}{2 - \rho_{\perp} - \rho_{//}}. \quad (4)$$

在计算金属反射率 ρ 时,需要将复折射率代替折射率,这里就需要用到光学常数 n 和 k 。菲涅耳反射系数 $\rho_{//}$ 和 ρ_{\perp} 的描述方法见数学公式(5~8),其中 θ 为观测角:

$$\rho_{\perp} = \frac{(\cos \theta - u)^2 + v^2}{(\cos \theta + u)^2 + v^2}, \quad (5)$$

$$\rho_{//} = \frac{[n^2(1-k^2)\cos\theta - u]^2 + [2n^2k\cos\theta - v]^2}{[n^2(1-k^2)\cos\theta + u]^2 + [2n^2k\cos\theta + v]^2}, \quad (6)$$

$$u = \sqrt{\frac{[(n^2 - k^2 - \sin^2\theta)^2 + 4n^2k^2]^{1/2} + (n^2 - k^2 - \sin^2\theta)}{2}}, \quad (7)$$

$$v = \sqrt{\frac{[(n^2 - k^2 - \sin^2\theta)^2 + 4n^2k^2]^{1/2} - (n^2 - k^2 - \sin^2\theta)}{2}}. \quad (8)$$

2.2 粗糙金属表面的模型

为了研究粗糙金属表面的热红外偏振特性模型问题,必须研究粗糙表面的统计性质。自然界中的粗糙表面几乎很难找出相同的两个表面,原因是粗糙表面的形成过程是随机的。对于自然界中所遇到的自然粗糙表面,比如海面,粗糙土壤地形,若事先没有关于表面的基本特征信息,很难确定粗糙表面的剖面形状。同样对于人工制造的粗糙金属表面,也需要事先给出一定的统计描述特征,只有这样才能获得粗糙金属表面的数学描述公式。

在以下的讨论中,假定粗糙金属表面是一个统计上的随机平稳过程。若用 $p(\alpha)$ 表示随机粗糙表面高度的概率密度函数,则可以假定随机粗糙表面高度的概率分布是取决于微表面法线和金属板法线之间倾角 α 的高斯分布^[14]。用数学公式(9)表示,其中 b 是常数, σ 为微粗糙度均方根差:

$$p(\alpha) = b \exp^{-\alpha^2/2\sigma^2}. \quad (9)$$

图 1 给出了金属微表面和金属板表面之间的关系示意图。在模型讨论中定义角度 γ 是金属微表面辐射和空间坐标 (x, y) 之间的立体旋转角,观测角 θ 为探测器和金属板表面法线之间的夹角,探测器和金属微表面法线之间的夹角为 ψ ,金属微表面法线在表面上投影和 x 轴夹角为 β 。

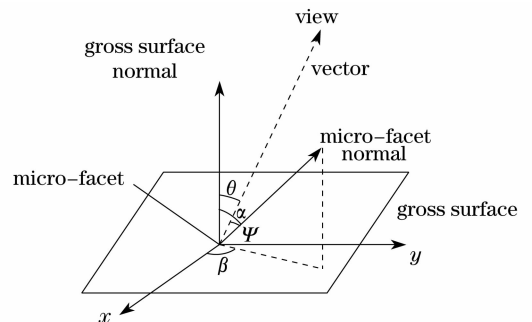


图 1 金属微表面坐标示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the micro-facet in common viewing image plane coordinate frame

当金属微表面和金属板表面两正交方向 (x', y') 与 (x, y) 之间有一个旋转角度 γ 时, (x, y) 到 (x', y') 的转换矩阵可以写为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma \\ -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix}, \quad (10)$$

γ 可以用 α, β, θ 来描述:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{-\cos \theta \sin \alpha \cos \beta + \sin \theta \cos \alpha}{\sin \alpha \sin \beta}\right), \quad (11)$$

则金属微表面的琼斯矩阵变换为

$$\mathbf{J}' = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \mathbf{J} \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma \\ -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{pp} & J_{ps} \\ J_{sp} & J_{ss} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

则 \mathbf{J}' 中的 J_{pp}, J_{ps}, J_{sp} 和 J_{ss} 就可以用微表面的高度概率密度函数 p , 菲涅耳反射系数 $\rho_{//}$ 和 ρ_{\perp} 来描述:

$$J_{pp} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \{\cos^2 \gamma \times [1 - \rho_{//}(\psi, n, k)] + \sin^2 \gamma \times [1 - \rho_{\perp}(\psi, n, k)]\} p \sin \gamma \, d\alpha \, d\beta, \quad (13)$$

$$J_{ss} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \{\cos^2 \gamma [1 - \rho_{\perp}(\psi, n, k)] + \sin^2 \gamma \times [1 - \rho_{//}(\psi, n, k)]\} p \sin \gamma \, d\alpha \, d\beta, \quad (14)$$

$$J_{sp} = J_{ps} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \{-\cos \gamma \sin \gamma [1 - \rho_{//}(\psi, n, k)] + \sin \gamma \cdot \cos \gamma \cdot [1 - \rho_{\perp}(\psi, n, k)]\} p \sin \gamma \, d\alpha \, d\beta. \quad (15)$$

最后准单色光的偏振度 P 可以通过式(4)计算得出。

2.3 考虑遮蔽效应时的模型

在研究随机表面散射问题时,特别提当金属板表面非常粗糙时($\sigma_m/\lambda \approx 1$ 式 $\sigma_m/\lambda > 1$)应该考虑遮蔽效应。所谓遮蔽效应指的是,随机表面上某些点可能被其它点遮挡而不能被入射光照到,或者它们发出的散射光被其它点遮挡而不能被探测到。在研究金属板热辐射的偏振特性时主要考虑随机表面上某些点发出的热辐射被其它点遮挡而不能被探测到。通常可以用遮蔽函数来衡量遮蔽效应的发生程度。对于随机表面,遮蔽函数被表示为一个概率。计算中采用了 Torrance-Sparrow 在研究随机表面散射问题时建立的经典模型^[14],其定义如下:

$$G(\alpha, \psi, \theta, \phi) = \min\left(1.0, \frac{2 \cos \alpha \cos \theta}{\cos \psi}, \frac{2 \cos \alpha \cos \phi}{\cos \psi}\right), \quad (16)$$

式中 ϕ 是照明光线的入射角,在研究金属板热辐射偏振特性时可以不考虑这一部分,因此该函数可以改写为

$$G(\alpha, \psi, \theta) = \min\left(1.0, \frac{2 \cos \alpha \cos \theta}{\cos \psi}\right), \quad (17)$$

因此 J_{pp}, J_{ps}, J_{sp} 和 J_{ss} 需要改写为

$$J_{pp} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \{\cos^2 \gamma [1 - \rho_{//}(\psi, n, k)] + \sin^2 \gamma [1 - \rho_{\perp}(\psi, n, k)]\} \sin \gamma G(\alpha, \psi, \theta) \times p \, d\alpha \, d\beta, \quad (18)$$

$$J_{ss} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \{\cos^2 \gamma [1 - \rho_{\perp}(\psi, n, k)] + \sin^2 \gamma (1 - \rho_{//}(\psi, n, k))\} p G(\alpha, \psi, \theta) \times \sin \gamma \, d\alpha \, d\beta, \quad (19)$$

$$J_{sp} = J_{ps} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \{\cos \gamma \sin \gamma [1 - \rho_{//}(\psi, n, k)] - \sin \gamma \cos \gamma \times (1 - \rho_{\perp}(\psi, n, k))\} p \times G(\alpha, \psi, \theta) \sin \gamma \, d\alpha \, d\beta. \quad (20)$$

3 实验方法

3.1 测量系统

实验中采用的热红外偏振成像探测系统其探测器为非制冷焦平面阵列,像元总数 320×240 ,响应波长范围 $8 \sim 14 \mu\text{m}$,量化准确度 14 bit。检偏器采用材料为 ZnSe 的金属线栅偏振片,消光比达到 300。由于系统偏振解析准确度分析起来较复杂和困难,所以一般采用实验室定标方法确定。在实验中选择的黑体其辐射的偏振度优于 0.001,系统测得的黑体辐射的偏振度为 0.009,所以系统的偏振解析准确度要优于 0.009。

3.2 实验步骤

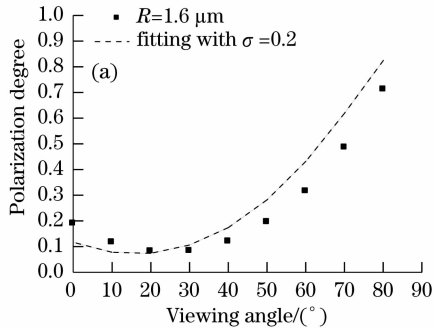
实验中使用的两块铝质目标板尺寸均为 $150 \times 150 \text{ mm}$ 。经 2201 型粗糙度轮廓仪检测,铝质目标板的轮廓平均偏差 R 分别为 $1.6 \mu\text{m}$ 和 $6.8 \mu\text{m}$ 。铝质目标板的表面采用喷砂的方式处理。实验中通过水浴箱对铝质目标板加热,水浴箱的加热温度控制在 $80 \text{ }^\circ\text{C}$,待目标表面温度稳定后进行测量。水浴箱放置在一个可旋转任意角度的支架上,支架距离观测系统 1 m。观测角的定义为目标热辐射和金属板表面法线的夹角。实验时观测角从 $0^\circ \sim 80^\circ$,每变化 10° 测量一次,每块目标板共测量 9 组数据。

4 仿真结果和讨论

4.1 未考虑遮蔽效应时的结果

根据讨论,初步建立起金属板表面热红外偏振特性与金属表面热红外辐射角、金属板表面粗糙度和光学常数之间关系的模型,通过计算机模拟可计

算出相关的关系曲线。在模拟中采用 Matlab 仿真软件对上面的模型进行仿真,图 2(a)是在实验室获得的铝质金属板偏振特性数据和模型模拟获得的数据比较结果。表面粗糙度 R 为 $1.6 \mu\text{m}$ 的金属板偏振特性测量数据在图中用点显示,曲线是根据模型仿真出的结果,其中 $\sigma=0.2$ 、 $n=25.3$ 、 $k=89.8$, n 和 k 值通过查 Al 金属的光学常数表获得。金属的光学常数在不同波段处有所不同,在 $8\sim 12 \mu\text{m}$ 波长范围内不同 n 、



k 值计算出的偏振度数据差别不大,因此以后的计算中我们均采用 $10 \mu\text{m}$ 处的 n 、 k 值。可见模型模拟出的结果基本符合了实验中获得的数据。

但在仿真更为粗糙($R=6.8 \mu\text{m}$)金属板表面的热红外偏振特性时,发现模型仿真出的数据和实验数据相差较大[图 2(b)],因此在后面的模型优化中考虑了遮蔽效应。

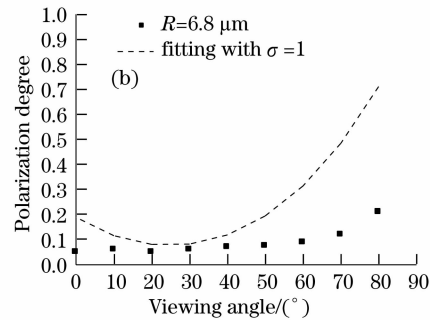


图 2 模拟结果与测量数据比较 $R=1.6 \mu\text{m}$; $\sigma=0.2$ (a) $R=6.8 \mu\text{m}$; $\sigma=1$ (b)

Fig. 2 Contrast between simulation results and measurement results $R=1.6 \mu\text{m}$; $\sigma=0.2$ (a) $R=6.8 \mu\text{m}$; $\sigma=1$ (b)

4.2 考虑遮蔽效应的结果

图 3 是根据式(18)~(20)和式(4)重新计算出的铝板表面偏振特性和实际测量获得数据比较。在这个模型中考虑了粗糙金属表面的遮蔽效应。表面粗糙度 R 为 $6.8 \mu\text{m}$ 的铝质金属板偏振特性测量数据在图中用点显示,曲线是在 $\sigma=1$ 、 $n=25.3$ 、 $k=89.8$ 时模拟出的结果。可见模型模拟出的结果在观测角大于 30° 时基本符合了实验中获得的数据,因此可认为前面图 2(b)的结果在观测角度较大时模型的误差主要是没有考虑粗糙金属表面的遮蔽效应造成的。

况和模型还有一定差别,只考虑了相邻凹坑形成的尖锋,即 M 型或 W 型结构。对于喷砂形成的表面,没有考虑 U 型凹坑底部的平面。而喷砂的直径较大时,这种因素的影响更加明显。另外也没有考虑到不同点热辐射在散射时的退偏效应。

5 结 论

通过对文中讨论的模型进行模拟仿真,获得了铝质金属板的光学常数,粗糙度和热辐射角三者与铝金属板表面偏振特性之间的关系曲线。对比实验获得的数据,可以发现对于较光滑的金属表面,不需要考虑遮蔽效应模型仿真出的结果就可以和实验数据达到基本一致。对于特别粗糙的金属表面模型,需要在考虑了遮蔽效应后,仿真出的结果才可以和实验数据能够较好的吻合,因此可以认为对于特别粗糙的金属表面,其遮蔽效应是影响金属表面热红外偏振特性的重要因素之一。

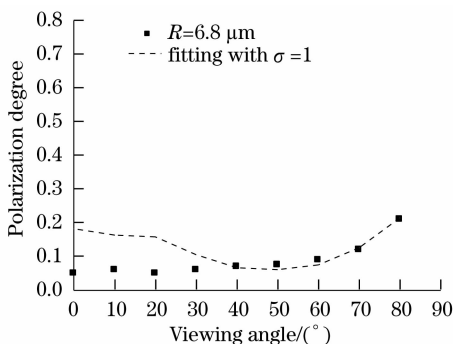


图 3 考虑遮蔽效应时模拟结果与测量数据比较($R=6.8 \mu\text{m}$; $\sigma=1$)

Fig. 3 Contrast between simulation results and measurement results considering the shadowing effect ($R=6.8 \mu\text{m}$; $\sigma=1$)

对于观测角小于 30° 时,实验数据和模拟结果还有一定差距。主要是由于金属板表面实际情

参 考 文 献

- 1 Frank Cremer, Wim de Jong, Klammer Schutte. Infrared polarization measurements and modeling applied to surface-laid antipersonnel landmines[J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(5): 1021~1032
- 2 Y. Aron, Y. Gronau. Polarization in the LWIR[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5783**: 653~661.
- 3 Wang Zhen, Qiao Yanli, Hong Jing *et al.*. Study of thermal polarization imaging measurement in target recognition [J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(2): 196~198

- 汪 震, 乔延利, 洪 津等. 热红外偏振成像技术在目标识别中的实验研究[J]. 光学技术, 2007, **33**(2):196~198
- 4 Wang Zhen, Qiao Yanli, Hong Jin *et al.*. Detecting camouflaged objects with thermal polarization imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(6):853~856
- 汪 震, 乔延利, 洪 津等. 利用热红外偏振成像技术识别伪装目标的研究[J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(6):853~856
- 5 D. L. Jordan, G. D. Lewis. Measurement of the effect of surface roughness on the polarization state of thermally emitted radiation [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(10): 692~694
- 6 Kristan P. Gurton and Rachid Dahmani. Effect of surface roughness and complex indices of refraction on polarized thermal emission[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(26):5361~5367
- 7 Wang Zhen, Hong Jin, Ye Song *et al.* Study on the effect of metal surface roughness on polarized thermal emission[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(8):1500~1503
- 汪 震, 洪 津, 叶 松等. 金属表面粗糙度对热红外偏振特性影响的研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(8):1500~1503
- 8 Lawrence B. Wolff. Image understanding from thermal emission polarization [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, June 1998:625~631
- 9 Wang Zhen, Qiao Yanli, Hong Jing *et al.*. Thermal emission polarization of metal plate at different viewing angles[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(6): 49~52
- 汪 震, 乔延利, 洪 津等. 金属热红外偏振的方向特性研究 [J]. 光电工程, 2007, **34**(6):49~52
- 10 Oscar Sandus. A review of emission polarization [J]. *Appl. Opt.*, 1965, **4**(12):1634~1642
- 11 Aristide Dogariu, Glenn D. Borman. Rough-surface polarization effects of infrared emission[C]. *Proc. SPIE.*, 1996, **2828**: 162~170
- 12 D. L. Jordan, G. D. Lewis, E. Jakeman. Emission polarization of roughened glass and aluminum surfaces [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(19): 3583~3590
- 13 Wellems David, Ortega Steve, Bowers David *et al.*. Long wave infrared polarimetric model: theory, measurements and parameters[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2006, **8**(10): 914~925
- 14 K. E. Torrance, E. M. Sparrow. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces [J]. *J. the Opt. Soc. Am.*, 1967, **57**(9):1105~1114

《中国激光》“综述”栏目征稿启事

《中国激光》创刊 30 多年以来,以反映我国激光领域的研究进展和成果为己任,见证了中国激光领域的发展历程和重大突破,在读者中树立了较高的学术地位,形成了较为成熟的办刊风格。近年来,激光研究的领域取得了令人瞩目的成就,在我国科技体系与国民经济中占据了越来越重要的地位,为了给广大研究人员提供更丰富、更全面的信息,应部分读者的要求,本刊增辟“综述”栏目,刊发综述类文章,反映激光领域热点专题的研究进展或动态。

具体要求:综述应尽可能就激光领域的研究热点结合最新的研究成果进行论述,涉及范围不需太大,但必须要有一定的深度和时间性,能反映出这一专题的历史背景、研究现状和发展趋势。执笔人(第一作者)应是在激光及其相关领域具有一定造诣,对某一方面有较深入研究的专家、学者。文章必须有作者自己的研究经验或体会,所介绍的工作应尽量适合国内已开展的工作或将要开展工作的需要。投稿同时,请作者提供详细的作者简介(包括研究领域、主要研究成果等)。

综述的写作格式一般包括四部分,即引言、正文、结论、参考文献。

引言,要用简明扼要的文字说明写作的目的、必要性、有关概念的定义,综述的范围,阐述有关问题的现状和动态,以及目前对主要问题争论的焦点等。引言一般以 200~300 字为宜,不宜超过 500 字。

正文,是综述的重点,应能较好地表达综合的内容。正文主要包括论据和论证两个部分,通过提出问题、分析问题和解决问题,比较不同学者对同一问题的看法及其理论依据,进一步阐明问题的来龙去脉和作者自己的见解。当然,作者也可从问题发生的历史背景、目前现状、发展方向等提出文献的不同观点。正文的重要部分应包括作者自己的工作实践。正文部分可根据内容的多少分为若干个小标题分别论述。

结论,是对综述正文部分作扼要的总结,作者应对各种观点进行综合评价,提出自己的看法,指出存在的问题及今后发展的方向和展望。

参考文献,是综述的重要组成部分。一般参考文献的多少可体现作者阅读文献的广度和深度,应以最近 3~5 年内的最新文献为主。

文章篇幅一般在 1 万字左右,一经录用,从速发表,稿酬从优。

投稿方式:网上投稿:www.opticsjournal.net 或 E-mail:zhgig@mail.shnc.ac.cn

咨询电话:021-69918427