

增强宽波段广角度减反射的类锥结构设计分析

尹靖博¹, 颜黄苹^{1,2*}, 曹生珠³, 周锐¹, 王子俊¹, 李远哲¹¹厦门大学航空航天学院, 福建 厦门 361005;²厦门大学深圳研究院, 广东 深圳 518000;³兰州空间技术物理研究所真空技术与物理重点实验室, 甘肃 兰州 730000

摘要 在宽波段内减少反射以提高透射或吸收对于提高光学元件及光电子器件的性能至关重要。受自然启发, 亚波长结构具有良好的宽带减反射性能。基于此, 提出了一种新型的类锥亚波长结构以增强宽波段减反射。采用等效介质理论与时域有限差分法, 对基底表面亚波长结构的等效折射率与减反射能力的关系进行了分析。通过对比蛾眼、圆锥及圆柱等不同结构的等效折射率对应的宽波段减反射性能, 发现两种介质之间的等效折射率线性过渡无突变时减反射能力更优。以此提出了一种类锥结构设计方法, 将该方法设计的三种结构与蛾眼结构在 300~1100 nm 波段进行了垂直入射下的表面反射率仿真分析, 结果显示, 该系列结构的平均反射率比蛾眼结构降低了约 70%。此外, 在可见光、近红外波段选取两个特征波长进行了宽角度(0~60°)下的反射率研究, 结果表明, 该系列结构的宽角度平均反射率均低于蛾眼结构, 其中四棱类锥结构在两个特征波长下的平均反射率比蛾眼结构分别降低了 62% 和 40%。采用此方法设计的系列结构比普通亚波长结构具有更佳的减反射效果, 在超精密光学芯片、片上光集成、片上光互连等领域中具有潜在的应用前景。

关键词 光学设计; 减反射; 亚波长结构; 等效折射率; 时域有限差分法

中图分类号 TB34;O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220818

1 引言

反射、透射和吸收^[1]是光与物质的几种相互作用形式, 不同介质之间折射率差引起的反射会造成能量转换效率低^[2]、信号干扰^[3]等。无论是提高太阳能电池的光电转换效率^[4], 还是增大半导体激光器光纤耦合系统的透过率与端面耦合效率^[5-6]、提升超精密光学仪器的精密探测能力^[7]及提高线偏振元件的横磁波透过率^[8], 在宽波段进行有效的减反射都是必要的。

目前常见的减反射方法主要是薄膜法与微纳结构法。薄膜法借助梯度折射率与干涉相消^[9]降低材料表面的菲涅耳反射损失。但单层减反射膜只能作用于特定波长, 而多层减反射膜材料的选择比较困难, 同时薄膜厚度的控制要求严格^[1,10], 且多层膜之间存在一定热失配以及机械稳定性问题^[11]。微纳结构法的研究热点是亚波长减反射结构。亚波长结构是一种排列有序的微纳周期结构, 可以等效为一个折射率渐变的介质层, 以此消除折射率失配^[12]。关于亚波长结构的研究集中在圆柱^[13-14]、金字塔^[15-16]、圆锥^[17]、圆台^[18]等常规几何结构上。林鹤等^[18]分析了圆台型结构的结构周期、底端

直径、结构高度及顶端直径对 0.41~5.00 μm 波段光透过率的影响, 在 ZnS 多光谱上最佳结构平均透过率可达 97%。近年来, 仿生微纳减反射结构日益受到关注。Sun 等^[19]通过紫外纳米压印技术在透明聚碳酸酯基板上制备了一种抛物面形的仿生蛾眼结构, 其直径和高度均为 200 nm 左右, 在 380~760 nm 波段的平均反射率为 1.21%。除受生物启发的抛物面形蛾眼结构外, Liu 等^[20]设计了一种用四次多项式描述的亚波长结构的优化方法, 该结构的等效折射率呈线性变化, 但是在基底处仍存在折射率突变。Yang 等^[21]研究了折射率梯度较小的双尺寸混合蛾眼结构, 相比于单一尺寸的蛾眼结构, 其减反射能力提高了 50%。惠爽谋等^[22]进一步对比了单一尺寸均匀蛾眼结构与双尺寸混合蛾眼结构的减反射性能, 也证明了混合蛾眼结构的减反射优势。兰俊等^[23]基于传统抛物面蛾眼结构, 设计了一种抛物面形苞状蛾眼结构, 在硅材料上仿真验证了当底面内接圆直径为 200 nm 时, 其减反射效果优于传统蛾眼结构与圆锥结构。

目前关于亚波长减反射结构的研究多集中于对已有结构进行尺寸参数与分布形式的调控^[13-14], 所得最

收稿日期: 2022-05-05; 修回日期: 2022-06-15; 录用日期: 2022-06-20; 网络首发日期: 2022-06-30

基金项目: 装备预研重点实验室基金(6142207200606)、广东省基础与应用基础研究基金(2020A1515010519)、福建省工业高校产学研合作项目(2019H6003)、福建省科技计划工业引导性重点项目(2020H0006)

通信作者: *hpyan@xmu.edu.cn

优值仅是此种结构下的最优情况;或是在原有结构基础上提出一种改进的新结构^[13-14],通过与原有结构进行减反射能力的对比以证明其更具优势。有别于以上两种思路,本文利用等效介质理论并结合时域有限差分法,获得了圆柱、圆锥及蛾眼结构的等效折射率和反射率曲线;通过分析等效折射率和反射率曲线之间的关系,并结合三种结构的等效折射率曲线,得出了一种减反射效果更佳的等效折射率曲线线型及过渡形式;以此为基础提出了一种类锥结构设计方法,该方法设计的所有微结构的等效折射率随高度呈近似线性变化,且在结构顶端处和基底处均无折射率突变;最后将该方法设计的三种结构与传统减反射效果较优的蛾眼结构进行了对比,验证了该方法设计的结

构具有更为优异的减反射性能。

2 亚波长结构的仿真分析

不同亚波长结构的减反射效果与其等效折射率有关。为了获得减反射效果最佳的等效折射率曲线线型,首先对圆柱、圆锥与蛾眼结构进行等效折射率计算与反射率仿真。利用三维绘图软件建立了圆柱、圆锥与蛾眼结构的 3D 仿真模型,如图 1(a)~(c)所示。整个结构分为两层,上层为减反射结构阵列,下层为基底层,材料选择为二氧化硅。设置其具有相同的底面直径、高度与占空比,对比三种结构的减反射性能。其中占空比表示单个微结构的底面直径与结构周期的比值。

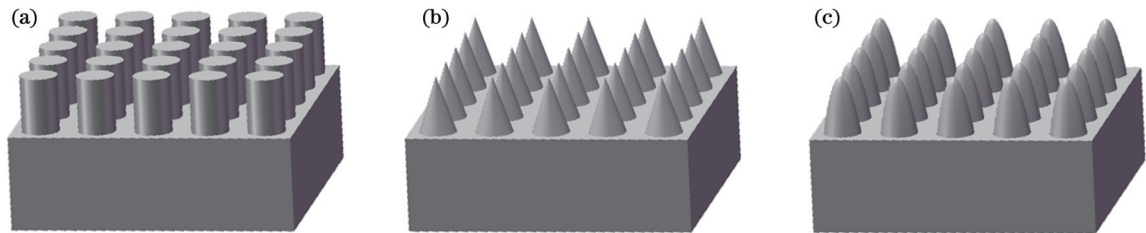


图 1 三维仿真模型示意图。(a)圆柱结构;(b)圆锥结构;(c)蛾眼结构

Fig. 1 Schematics of 3D simulation model. (a) Cylindrical structure; (b) conical structure; (c) moth-eye structure

首先通过等效介质理论分别计算三种结构的等效折射率,其值^[24]可近似表示为

$$n_e(h) = \left\{ f(h)n_{\text{SiO}_2}^q + [1 - f(h)]n_{\text{air}}^q \right\}^{\frac{1}{q}}, \quad (1)$$

式中: $n_e(h)$ 为微结构在高度 h 处的等效折射率;填充因子 $f(h)$ 为微结构在高度 h 处对应的截面面积与基底面周期面积之比; n_{SiO_2} 为二氧化硅折射率,取 1.56; n_{air} 为空气折射率,取 1; q 为常数 2/3。

对于蛾眼结构,有

$$f(h) = \frac{\pi}{4D} \left(\frac{H-h}{H} \right), \quad (2)$$

对于圆锥结构,有

$$f(h) = \frac{\pi}{4D} \left(\frac{H-h}{H} \right)^2, \quad (3)$$

对于圆柱结构,有

$$f(h) = \frac{\pi}{4D}, \quad (4)$$

式中: H 为微结构的总高度; D 为微结构的占空比,此处为 2/3。其中,圆柱的填充因子是与高度 h 无关的定值,具体数值大小仅与占空比 D 相关。

根据式(1)~(4), H 的取值不影响等效折射率的线型,选取 H 为 500 nm,并记微结构底端与基底相接面为零高度面,则不同结构中在 SiO_2 基底到 SiO_2 纳米阵列顶端区间空气的等效折射率曲线如图 2 所示。由式(4)可知,圆柱结构的填充因子仅与占空比有关,因此如图 2 所示,圆柱结构的等效折射率曲线为介于两

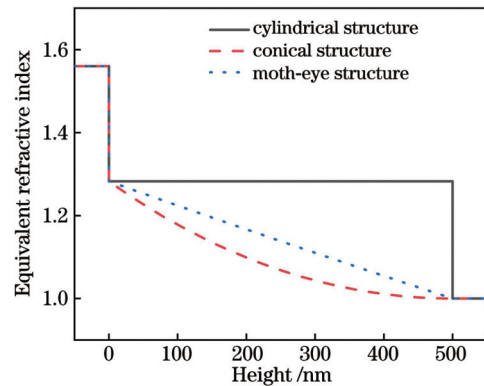


图 2 三种不同结构的等效折射率曲线

Fig. 2 Equivalent refractive index curves of three different structures

种介质折射率之间的一条平行于横轴的直线,且等效折射率数值随填充因子的改变而改变。圆锥与蛾眼结构的等效折射率曲线分别表现为曲线与类直线的过渡形式。下面将结合三种结构的反射率,分析等效折射率曲线与结构减反射能力之间的关系。

选择占空比为 2/3,微结构的底面内接圆直径(ϕ)分别为 200、300、500 nm,深宽比(γ)分别为 0.5、1.0、1.5。其中深宽比 γ 表示微结构的高度与底边直径的比值。300~1100 nm 波段的反射率以及整个波段的平均反射率如图 3 所示。平均反射率(\bar{R})公式为

$$\bar{R} = \frac{\int R(\lambda) d\lambda}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad (5)$$

式中： R 为反射率； λ 为入射光波长； $\lambda_1=300\text{ nm}$ ； $\lambda_2=1100\text{ nm}$ 。

由图 3 可见，在圆柱结构底面直径为 200 nm 的条件下，其在深宽比为 0.5 时取得了平均反射率的最低值，深宽比为 1.0 时取得次低值。圆柱结构的等效折射率曲线平行于横轴，因此该结构可以近似为单层膜结构。实现最小反射率需满足以下两个条件：

$$n_c = (n_{\text{air}} n_{\text{SiO}_2})^{1/2}, \quad (6)$$

$$d = \lambda / (4n_c), \quad (7)$$

式中： n_c 为两种介质间理想单层膜的折射率（在此例下 n_c 取值约为 1.25）； d 为理想单层膜的厚度。由式 (1)、(4) 得，圆柱结构在占空比为 2/3 时的等效折射率约为 1.28，此时近似满足式 (6)。由于单层膜只在特定波长处取得最小反射率，当宽波段为 300~1100 nm 时，由式 (7) 得，需满足 $60\text{ nm} \leq d \leq 220\text{ nm}$ 。对于图 3 中圆柱结构的九种尺寸参数，仅在圆柱直径为 200 nm、深宽比为 0.5 和 1.0 时，厚度 d 符合要求，故圆柱结构在此两种参数下的平均反射率相对较低。

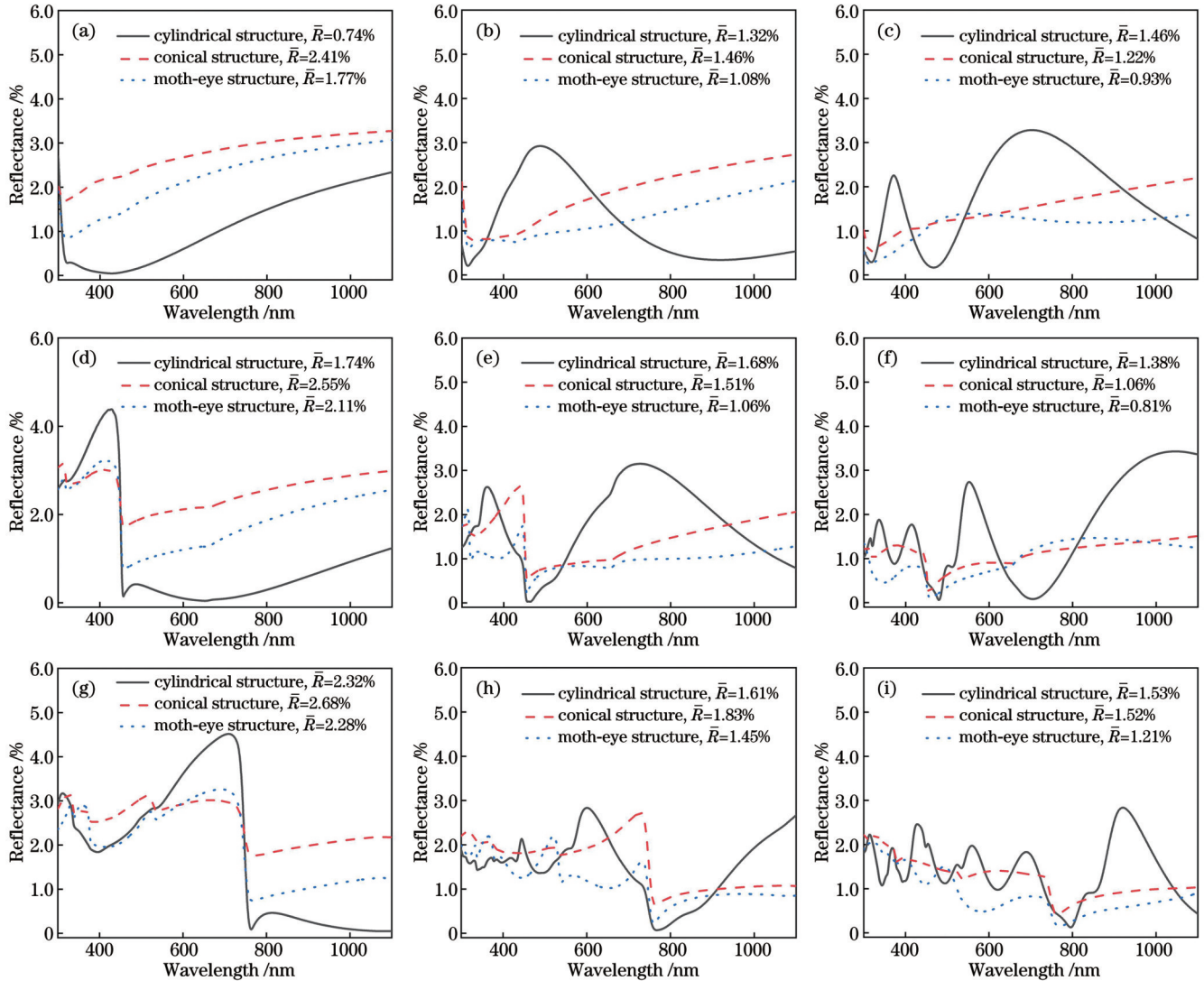


图 3 不同参数下三种结构的反射率曲线。(a) $\phi=200\text{ nm}$, $\gamma=0.5$ ；(b) $\phi=200\text{ nm}$, $\gamma=1.0$ ；(c) $\phi=200\text{ nm}$, $\gamma=1.5$ ；(d) $\phi=300\text{ nm}$, $\gamma=0.5$ ；(e) $\phi=300\text{ nm}$, $\gamma=1.0$ ；(f) $\phi=300\text{ nm}$, $\gamma=1.5$ ；(g) $\phi=500\text{ nm}$, $\gamma=0.5$ ；(h) $\phi=500\text{ nm}$, $\gamma=1.0$ ；(i) $\phi=500\text{ nm}$, $\gamma=1.5$
 Fig. 3 Reflectance curves of three structures under different parameters. (a) $\phi=200\text{ nm}$, $\gamma=0.5$ ；(b) $\phi=200\text{ nm}$, $\gamma=1.0$ ；(c) $\phi=200\text{ nm}$, $\gamma=1.5$ ；(d) $\phi=300\text{ nm}$, $\gamma=0.5$ ；(e) $\phi=300\text{ nm}$, $\gamma=1.0$ ；(f) $\phi=300\text{ nm}$, $\gamma=1.5$ ；(g) $\phi=500\text{ nm}$, $\gamma=0.5$ ；(h) $\phi=500\text{ nm}$, $\gamma=1.0$ ；(i) $\phi=500\text{ nm}$, $\gamma=1.5$

已有研究表明，与蛾眼结构相似的凸圆锥结构的减反射性能优于普通圆锥^[25]。由图 3 也可见，相同参数下的蛾眼结构的平均反射率均低于圆锥结构，这表明蛾眼结构的等效折射率曲线线型比圆锥结构更具减反射优势。从图 2 可见，蛾眼结构与圆锥结构的等效折射率分别表现为线性过渡与曲线过渡形式，由此可

得等效折射率线性过渡形式可以更好地消除两种介质之间的折射率突变，进而具有更佳的减反射能力。

由式 (1) 可知，等效折射率分别在 $f(h)$ 取 0 和 1 时获得最小值 n_{air} 与最大值 n_{SiO_2} ，且在 0~1 区间随填充因子 $f(h)$ 呈单调递增变化。对于圆锥与蛾眼结构，占空比 D 在 0~1 区间变化时，填充因子 $f(h)$ 随其呈单调

递增变化。但是圆锥与蛾眼结构在 D 为 1 时, 基底面仍存在空隙, 即填充因子 $f(h)$ 的取值范围为 $0 \sim \frac{\pi}{4}$, 此时折射率的取值最小值为 n_{air} , 取值最大值为 $\left[\frac{\pi}{4} n_{\text{SiO}_2}^q + \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) n_{\text{air}}^q \right]^{\frac{1}{q}}$ (记为 n_M , 此例下取值约为 1.43)。因此, 微结构顶端与空气相接面处无折射率突变, 且整个结构的折射率自上而下的变化为两个阶段, 分别是微结构高度从 H 变到 0 时等效折射率从

n_{air} 渐变到 n_M 以及在微结构与基底相接面上等效折射率从 n_M 突变到 n_{SiO_2} 。对于等效折射率渐变部分, 深宽比增大会使渐变更加平缓, 故由图 3 可见, 随着微结构深宽比的增大, 圆锥以及蛾眼结构的平均反射率呈下降趋势^[26]。对于等效折射率突变部分, 突变值随占空比的增加而减小, 因此对于圆锥结构与蛾眼结构, 满占空比时减反射效果最好。以底面直径为 200 nm 和 300 nm 的蛾眼结构为例, 在 300~1100 nm 波段的反射率随占空比的变化曲线如图 4 所示。

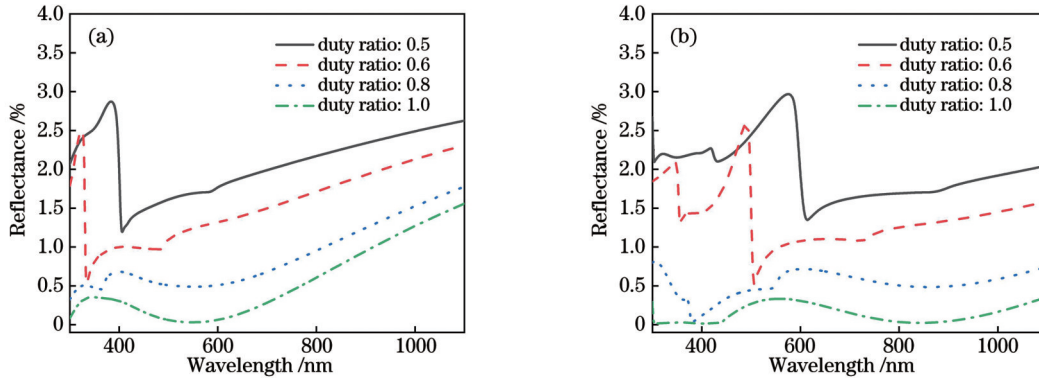


图 4 不同 ϕ 下蛾眼结构的反射率曲线。(a) $\phi=200$ nm; (b) $\phi=300$ nm
Fig. 4 Reflectance curves of moth-eye structures under different ϕ . (a) $\phi=200$ nm; (b) $\phi=300$ nm

通过上述分析, 利用等效折射率理论可以解释亚波长结构的减反射效果差异: 圆柱结构在满足单层膜最小反射率设计条件时, 其特定波长下的减反射效果较好; 而圆锥和蛾眼结构由于等效折射率曲线呈过渡变化形式, 相对于圆柱结构更具有宽带减反射优势。

3 类锥结构模型建立与分析

为进一步提高亚波长结构阵列的宽带减反射能力, 在圆锥与蛾眼结构的基础上, 研究了等效折射率最接近线性过渡形式且在基底面处等效折射率无突变的新型结构设计方法。亚波长结构阵列的等效折射率和填充因子可表示为

$$n_{\text{line}}(h) = \left\{ f_{\text{line}}(h) n_{\text{SiO}_2}^q + [1 - f_{\text{line}}(h)] n_{\text{air}}^q \right\}^{\frac{1}{q}}, \quad (8)$$

$$f_{\text{line}}(h) = A \left(\frac{h}{H} \right)^x, \quad (9)$$

式中: 微结构的总高度为 H , 此处为使求导计算后的结果更加简化, 将微结构顶端记为零高度点, 基底面处高度为 H ; $n_{\text{line}}(h)$ 为微结构在高度 h 处的等效折射率; $f_{\text{line}}(h)$ 为填充因子; A, x 为待定系数, 其中 A 反映微结构在基底面上填充的紧密程度, 取值范围为 $0 \sim 1$ 。

为满足等效折射率在基底面处无突变, 基底处 $f_{\text{line}}(H)$ 需取 1, 故 A 为 1; 为满足等效折射率可以实现完全的线性过渡, 等效折射率的一阶导数 $n'_{\text{line}}(h)$ 需为

常数且不为 0。将常数项参数代入, 得

$$n'_{\text{line}}(h) = 0.525 \left[\frac{\left(1 + 0.35 \frac{h^x}{H^x} \right) \left(x^2 h^{2x-2} \right)}{H^{2x}} \right]^{0.5}. \quad (10)$$

当且仅当 x 取 0 时, $n'_{\text{line}}(h)$ 恒为常数 0, 此时微结构为圆柱结构; 除此之外, 无论 x 取何值, 等效折射率的一阶导数 $n'_{\text{line}}(h)$ 不可能恒为常数。

由于 $n'_{\text{line}}(h)$ 的形式较为复杂, 故采用图解法研究 x 对等效折射率 $n_{\text{line}}(h)$ 的影响。由上述对蛾眼结构的分析可得, 当 x 取 1.00 时, 等效折射率曲线近似为直线, 故在 1.00 两端分别取 $x=0.90, 0.95, 1.05, 1.10$, 选取 H 为 500 nm, 等效折射率曲线如图 5(a) 所示。

当 x 为 0.95 时, 等效折射率曲线与一次函数标准直线几乎重合, 故进一步在 0.95 附近取 $x=0.93, 0.94, 0.96, 0.97$, 等效折射率曲线如图 5(b) 所示。

当 x 取 0.93, 0.94, 0.95 和 0.96 时, 曲线相距较近, 无法通过图解法比较其与标准直线的差距, 记 $x=i$ 时在高度 h 处的等效折射率为 $n_{x=i}(h)$, 标准直线在高度 h 处的等效折射率为 $n_0(h)$, 则差值 E 为

$$E = \frac{\int |n_{x=i}(h) - n_0(h)| dh}{H}. \quad (11)$$

不同 x 下的差值 E 如表 1 所示, 其中 $x=0.95$ 时, 差值 E 最小, 即此时微结构的等效折射率曲线最接近直线, 同时由图 5 及表 1 中的数据易知, 在 $x=0.95$ 附

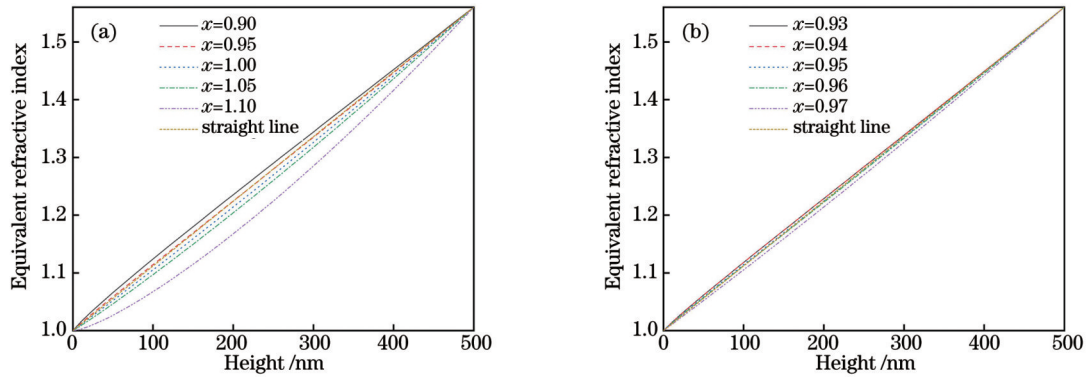


图 5 不同 x 下的等效折射率。(a) 宽 x 范围; (b) 窄 x 范围

Fig. 5 Equivalent refractive indices under different x . (a) Wide x range; (b) narrow x range

表 1 不同 x 下的差值 E
Table 1 E under different x

x	0.93	0.94	0.95	0.96
E	0.0032	0.0018	0.0012	0.0016

近, 曲线和差值均接近, 故不继续对 x 进行细分。

综上所述, 提出了一种新型类锥结构, 该系列结构的填充因子满足 $f(h) = \left(\frac{H-h}{H}\right)^{0.95}$, 则微结构的等效折射率最接近线性过渡形式且在微结构顶端和基底面处均无折射率突变。

为使类锥结构的填充因子满足要求, 首先对阵列中的单个微结构进行分析, 其参数设置如图 6 所示, 将微结构的底面积记为 S_z , 微结构总高度记为 H , 微结构在高度 h 处的横截面积记为 $S_w(h)$ 。为满足填充因子的要求, 参数需满足

$$\frac{S_w(h)}{S_z} = \left(\frac{H-h}{H}\right)^{0.95} \quad (12)$$

单个微结构满足填充因子要求后, 对于由 k 个微结构组成的阵列结构, 只有当微结构在基底面无缝隙

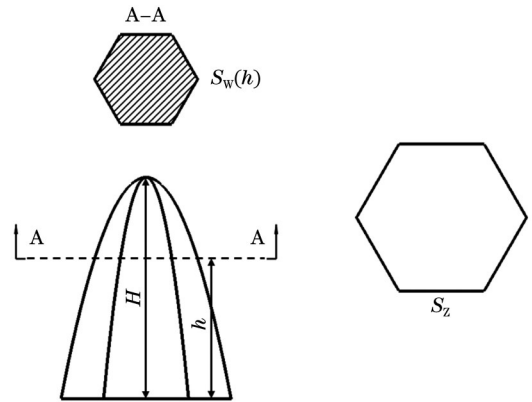


图 6 微结构参数示意图

Fig. 6 Schematic of microstructure parameters

填充时, 整个阵列结构的填充因子满足 $f(h) = \frac{k \times S_w(h)}{k \times S_z} = \left(\frac{H-h}{H}\right)^{0.95}$ 。

基于上述对单个微结构形式及阵列分布形式的分析, 利用三维建模软件建立了该方法设计的几种类锥结构模型。如图 7 所示, 其中基底上方的微结构仅为其分布形式示意, 按照此分布继续延伸排列则可以无

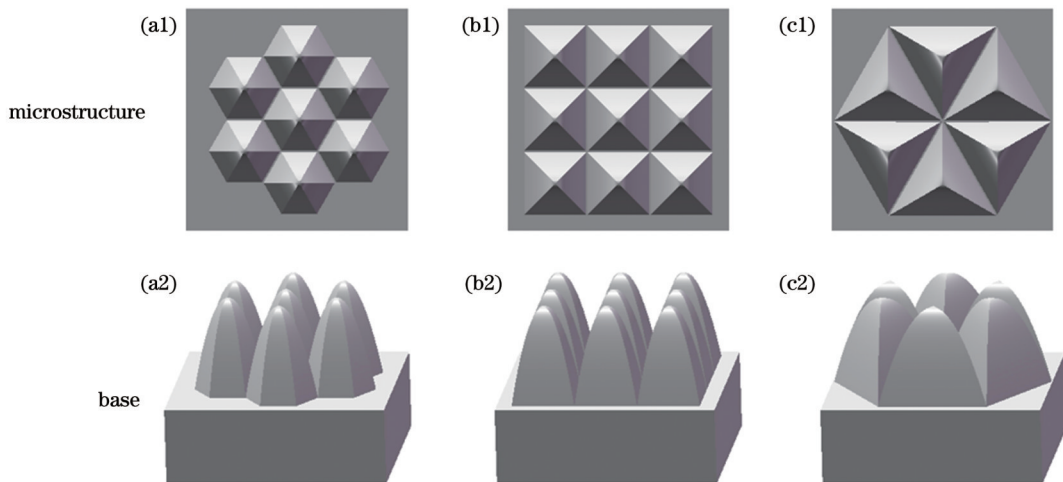


图 7 设计的类锥结构。(a1)(a2) 六棱结构; (b1)(b2) 四棱结构; (c1)(c2) 三棱结构

Fig. 7 Designed cone-like structures. (a1)(a2) Hexagonal pyramid structure; (b1)(b2) tetragonal pyramid structure; (c1)(c2) triangular pyramid structure

缝隙填充整个基底面。

选取 H 为 500 nm, 类锥结构与其他几种常见结构的等效折射率如图 8 所示, 其中类锥结构的等效折射率曲线最接近线性过渡形式且在微结构顶端和基底面处均无折射率突变。

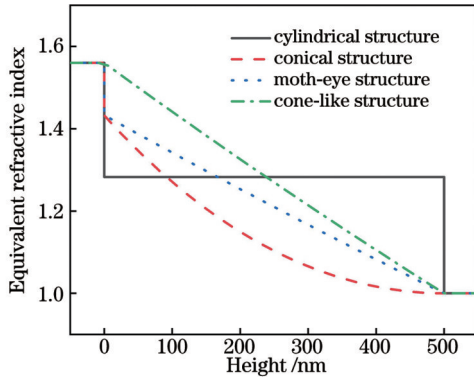


图 8 不同结构的等效折射率曲线

Fig. 8 Equivalent refractive index curves of different structures

4 仿真结果与分析

上述分析仅说明了类锥结构系列的设计方法, 下面对该方法设计的三棱、四棱、六棱类锥与抛物面形蛾眼结构进行对比分析, 以验证该方法设计的系列微结构的减反射性能。选取蛾眼结构的占空比为 1, 在 300~1100 nm 波段内, 选择微结构的底面内接圆直径为 200、300、500 nm。同时考虑到实际应用中过大深

宽比存在加工困难的问题, 故选择深宽比为 1.0、1.5、2.0、2.5。

微结构平均反射率如图 9 所示, 当底面内接圆直径为 200 nm、深宽比为 1.0 时, 蛾眼结构的平均反射率略低于三种类锥, 但随着深宽比的增加, 蛾眼结构的平均反射率的下降速率低于三种类锥。在深宽比为 1.5、2.0 和 2.5 时, 三种类锥的平均反射率均低于蛾眼结构。四种结构的宽波段反射率如图 10 所示, 深宽比为 1.5 时, 三种类锥结构在可见光波段的反射率明显低于蛾眼结构。随着深宽比的增加, 蛾眼结构的反射率曲线在波长大于 600 nm 时, 位于其他三条曲线的上方, 表明类锥系列在深宽比为 2.0 和 2.5 时, 对红光以及近红外光的减反射效果优于蛾眼结构, 可减小光学器件红外波段的反射率。

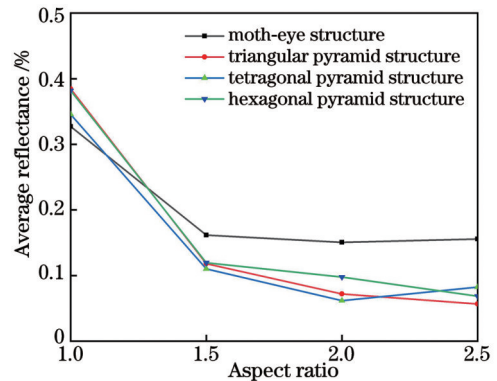


图 9 $\phi=200$ nm 时的平均反射率

Fig. 9 Average reflectance when $\phi=200$ nm

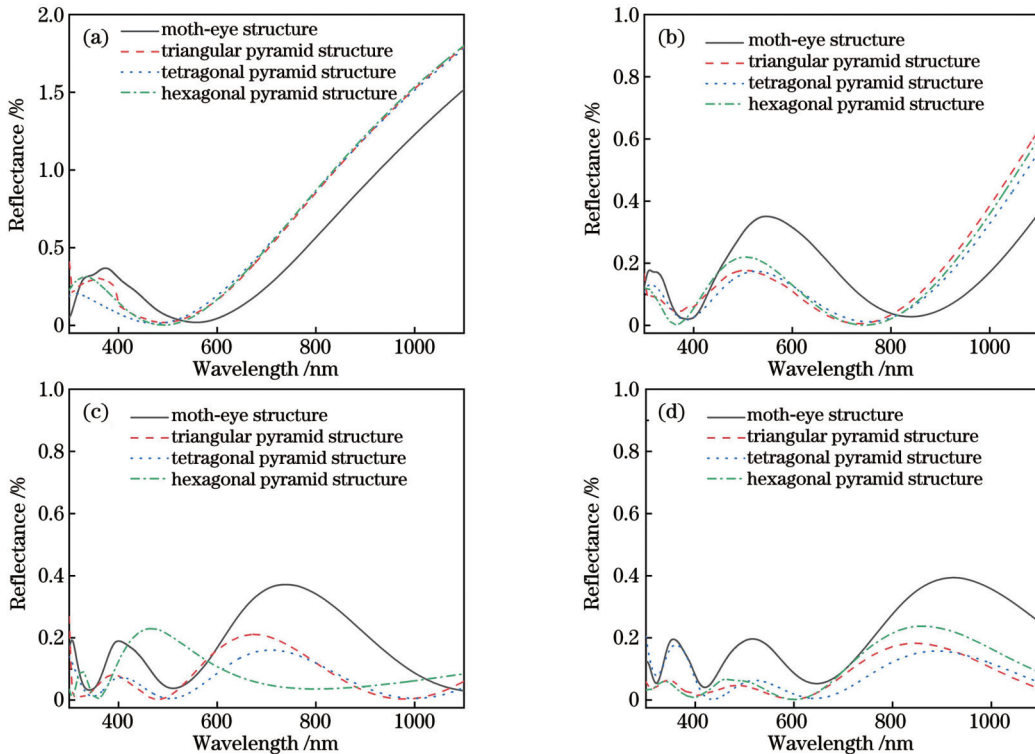


图 10 $\phi=200$ nm 时的反射率曲线。(a) $\gamma=1.0$; (b) $\gamma=1.5$; (c) $\gamma=2.0$; (d) $\gamma=2.5$

Fig. 10 Reflectance curves when $\phi=200$ nm. (a) $\gamma=1.0$; (b) $\gamma=1.5$; (c) $\gamma=2.0$; (d) $\gamma=2.5$

底面内接圆直径为 300 nm 和 500 nm 时,四种微结构的平均反射率如图 11 所示。综上可见,当深宽比为 1.0 时,蛾眼结构仅在反射率最高值处的减反射效果优于类锥结构。而在深宽比为 1.5、2.0 和 2.5 时,类锥结构的减反射效果均明显优于蛾眼结构。

此外,三类锥结构在深宽比为 1.5 时的反射率低于同尺寸蛾眼结构在深宽比为 2.0 和 2.5 时的反射率。这对于深宽比过大引起的加工受限问题具有实际意义,可见类锥结构在减反射领域内极具研究价值。

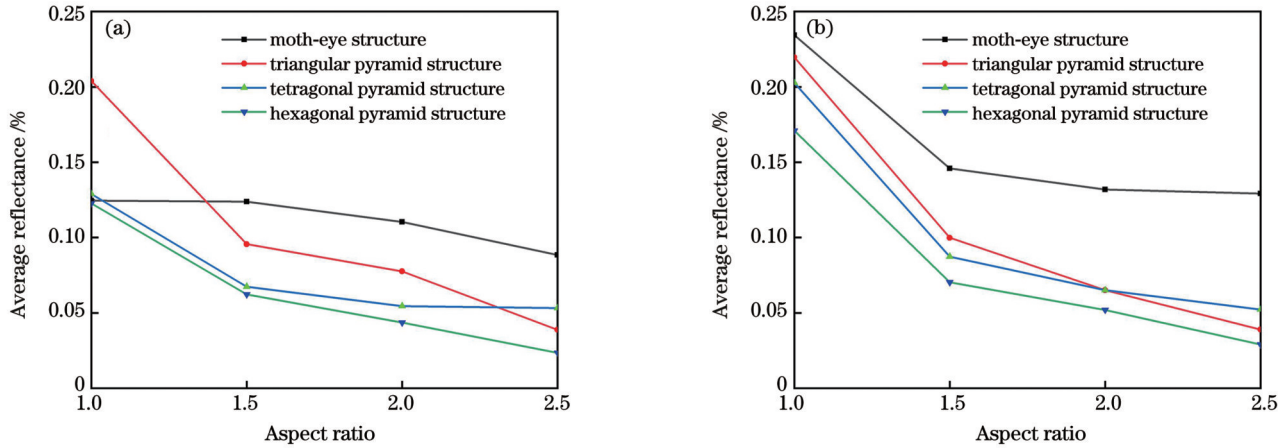


图 11 不同 ϕ 下四种微结构的平均反射率曲线。(a) $\phi=300\text{ nm}$; (b) $\phi=500\text{ nm}$

Fig. 11 Average reflectance curves of four microstructures under different ϕ . (a) $\phi=300\text{ nm}$; (b) $\phi=500\text{ nm}$

进一步对比类锥结构与蛾眼结构的宽角度减反射性能,选择微结构底面内接圆直径为 200 nm,深宽比为 2.5。由图 10(d)可知,三类锥结构与蛾眼结构在 500 nm 和 850 nm 入射光波长附近的反射率均出现

较大值,故在可见光与红外波段分别选取 500 nm 和 850 nm 为特征波长,四种结构在入射角为 $0\sim 60^\circ$ 时的反射率曲线如图 12 所示。

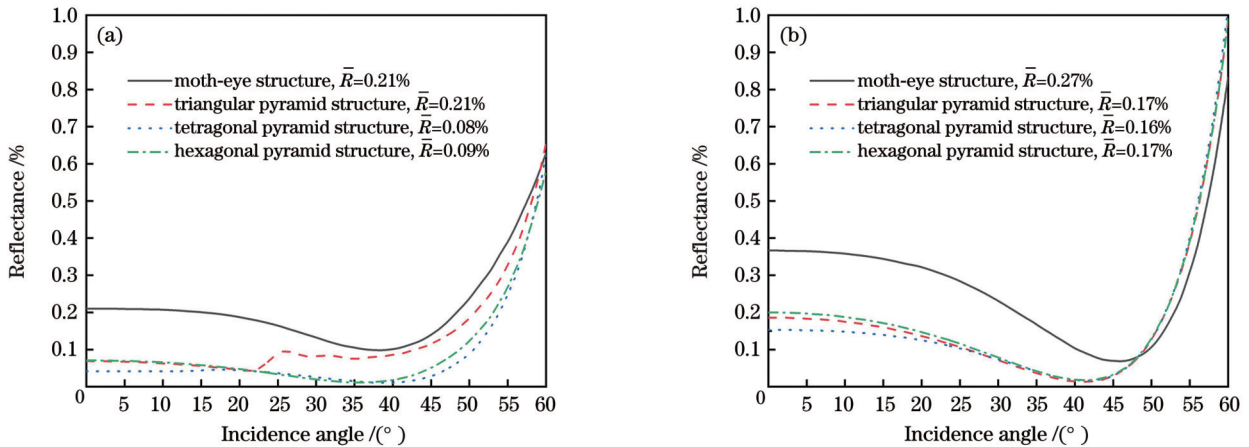


图 12 不同 λ 下四种微结构的宽角度反射率曲线。(a) $\lambda=500\text{ nm}$; (b) $\lambda=850\text{ nm}$

Fig. 12 Wide-angle reflectance curves of four microstructures under different λ . (a) $\lambda=500\text{ nm}$; (b) $\lambda=850\text{ nm}$

四种结构在反射率较大值对应波长处的宽角度反射率均小于 1%,如图 12(a)所示,当入射光波长为 500 nm 时,三类锥结构在入射角为 $0\sim 60^\circ$ 时的反射率均低于蛾眼结构,四棱类锥的宽角度平均反射率(0.08%)为蛾眼结构(0.21%)的 38%。如图 12(b)所示,当入射光波长为 850 nm 时,三类锥结构在入射角为 $0\sim 48^\circ$ 时的反射率均低于蛾眼结构,三类锥结构的宽角度平均反射率为蛾眼结构的 60% 左右,表明类锥结构在宽角度下的减反射性能仍优于蛾眼结构。

除结构的反射率外,同时研究了不同结构表面的光反射情况。以四棱类锥结构为例,与蛾眼结构进行了对比,选择微结构底面内接圆直径为 200 nm,深宽比为 2.5。将过微结构底面中心点与侧面法线的 XZ 平面设为监测截面,入射波长为 850 nm 时的电场强度如图 13 所示,其中 $|E|$ 为归一化后的电场强度。可以看到:两种结构上方均出现干涉条纹,且蛾眼结构更明显,四棱类锥结构较模糊;电场强度峰值所在区域的反射较强,反射率较高,而四棱类锥结构的反射率峰值与高反射区域均小于蛾眼结构,说明其具有更优的减反射性能。

除结构的反射率外,同时研究了不同结构表面的

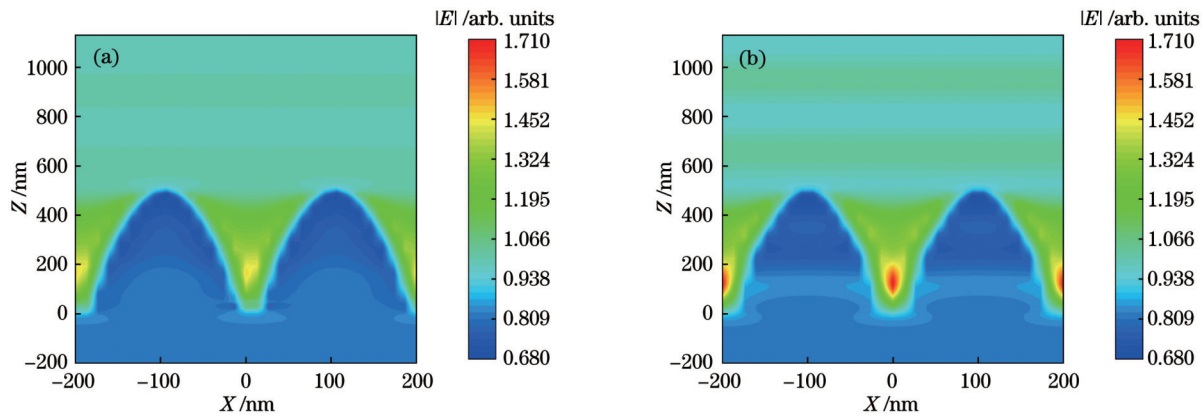


图 13 两种结构的电场强度分布。(a)类锥结构;(b)蛾眼结构

Fig. 13 Electric field intensity distributions of two structures. (a) Cone-like structure; (b) moth-eye structure

5 结 论

基于等效介质理论与时域有限差分法,分析了蛾眼、圆锥、圆柱三种亚波长结构的等效折射率曲线与减反射性能之间的关系,从亚波长结构的等效折射率调控入手,提出了一种等效折射率呈线性过渡且在微结构顶端和基底面处均无折射率突变的类锥结构设计方法。取该方法设计的三种典型结构与蛾眼结构在 300~1100 nm 宽波段区域进行了反射率对比,结果表明,在深宽比为 1.5、2.0 和 2.5 时,三种结构的反射率均低于蛾眼结构。四种结构均在深宽比为 2.5 时取得最低的平均反射率,其中六棱类锥最低,减反射效果最优。在微结构底面内接圆直径为 500 nm、深宽比为 2.5 时,六棱类锥的最优平均反射率(0.029%)为蛾眼结构最优平均反射率(0.129%)的 22.5%。在其他参数下,相比蛾眼结构的最优反射率,该系列结构的反射率平均减小了近 70%。进一步对比了类锥结构与蛾眼结构在入射角为 0~60° 时的反射率。整体上,三类锥结构的宽角度减反射性能仍优于蛾眼结构,其中当入射光波长为 500 nm 时,四棱类锥的宽角度平均反射率相比蛾眼结构减小了 62%。所提出的关于微结构等效折射率过渡形式与底面分布形式的设计方法不局限于某一特定结构,可灵活应用于各类减反射微结构的优化中。对其结构参数进行调控,使其等效折射率达到此种结构形式下的最优,而类锥结构是在满足所有优化条件后得到的一类更具减反射优势的结构。目前通过先进加工手段完全可实现特征尺寸为 200~500 nm 的超精密加工,因此所提出的微结构设计方法及微结构在基底面处的分布形式在超精密光学芯片、片上光集成、片上光互连等领域中具有潜在的应用前景。

参 考 文 献

[1] 付秀华, 潘永刚, 刘冬梅, 等. 光谱探测中的超宽带减反射膜[J]. 光子学报, 2015, 44(8): 0831001.
Fu X H, Pan Y G, Liu D M, et al. Ultra-broad band anti-

reflection coating spectrum detection[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(8): 0831001.

[2] Tommila J, Aho A, Tukiainen A, et al. Moth-eye antireflection coating fabricated by nanoimprint lithography on 1 eV dilute nitride solar cell[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2013, 21(5): 1158-1162.

[3] 范培迅, 钟敏霖. 超快激光制备金属表面微纳米抗反射结构进展[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(6): 0621001.
Fan P X, Zhong M L. Progress on ultrafast laser fabricating metal surface micro-nano antireflection structures[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(6): 0621001.

[4] 田冰涛, 王晓栋, 牛彦彦, 等. 溶胶-凝胶法制备 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳能电池梯度折射率减反射膜[J]. 光子学报, 2016, 45(8): 0831001.
Tian B T, Wang X D, Niu Y Y, et al. Sol-gel preparation of graded-refractive-index antireflective coatings for GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(8): 0831001.

[5] 高婷, 曲轶, 郑晓刚, 等. 光纤端面宽带减反射膜制备[J]. 光电子·激光, 2014, 25(4): 687-691.
Gao T, Qu Y, Zheng X G, et al. Preparation of broadband anti-reflection coating on the end of fiber[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2014, 25(4): 687-691.

[6] 李美萱, 王丽, 王美娇, 等. 多功能光纤端面激光宽带减反射膜的应用研究[J]. 激光与红外, 2016, 46(10): 1279-1283.
Li M X, Wang L, Wang M J, et al. Application research on multifunction fiber end laser broadband antireflection film[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(10): 1279-1283.

[7] 林国画, 张磊, 张敏. 红外焦平面探测器杜瓦组件杂散辐射研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(9): 1108-1112.
Lin G H, Zhang L, Zhang M. Study on stray radiation of infrared detector Dewar assembly[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(9): 1108-1112.

[8] 付秀华, 林晓敏, 张功, 等. 红外宽波段亚波长金属线栅偏振元件的研制[J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0903002.
Fu X H, Lin X M, Zhang G, et al. Development of infrared wide band polarizing elements with subwavelength metal wire grids[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0903002.

[9] Chattopadhyay S, Huang Y F, Jen Y J, et al. Anti-reflecting and photonic nanostructures[J]. Materials Science and Engineering R: Reports, 2010, 69(1/2/3): 1-35.

[10] Peng Y J, Huang H X, Xie H. Rapid fabrication of antireflective pyramid structure on polystyrene film used as protective layer of solar cell[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017, 171: 98-105.

[11] Li Y F, Zhang J H, Yang B. Antireflective surfaces based on biomimetic nanopillared arrays[J]. Nano Today, 2010, 5(2): 117-127.

[12] Han Z W, Jiao Z B, Niu S C, et al. Ascendant bioinspired

- antireflective materials: opportunities and challenges coexist[J]. *Progress in Materials Science*, 2019, 103: 1-68.
- [13] Oh Y J, Kim J J, Jeong K H. Biologically inspired biophotonic surfaces with self-antireflection[J]. *Small*, 2014, 10(13): 2558-2563.
- [14] 潘峰, 张旺, 张荻. 仿生纳米硅结构减反射及陷光性能模拟研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0516002.
Pan F, Zhang W, Zhang D. Simulation of anti-reflection and light-trapping property of bio-inspired silicon structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0516002.
- [15] 张玉涛, 宣益民. 宽光谱太阳能电池减反表面光谱特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2015, 36(12): 2689-2693.
Zhang Y T, Xuan Y M. Spectral features of broadband anti-reflection structured surface for Si solar cell[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2015, 36(12): 2689-2693.
- [16] 葛少博, 刘卫国, 周顺, 等. 薄膜微结构的近红外透射诱导增强特性[J]. *光子学报*, 2019, 48(7): 0731001.
Ge S B, Liu W G, Zhou S, et al. Characteristics of near-infrared induced transmission enhancement of thin film micro-structures[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(7): 0731001.
- [17] 郭旭东, 董亭亭, 付跃刚, 等. 圆锥形仿生蛾眼抗反射微纳结构的研制[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(9): 0910002.
Guo X D, Dong T T, Fu Y G, et al. Development of bionic moth-eye anti-reflective conical micro-nano structure[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0910002.
- [18] 林鹤, 付跃刚, 欧阳名钊, 等. 宽光谱广角蛾眼抗反射超表面结构设计分析[J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0113002.
Lin H, Fu Y G, Ouyang M Z, et al. Design and analysis of moth-eye antireflective metasurface structure with broadband and wide-angle[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0113002.
- [19] Sun J Y, Wang X B, Wu J H, et al. Biomimetic moth-eye nanofabrication: enhanced antireflection with superior self-cleaning characteristic[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 5438.
- [20] Liu X G, Wang Y F. Shape optimization of moth-eye structure for omnidirectional and broadband antireflection[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2019, 58(6): 060904.
- [21] Yang L Y, Feng Q, Ng B H, et al. Hybrid moth-eye structures for enhanced broadband antireflection characteristics[J]. *Applied Physics Express*, 2010, 3(10): 102602.
- [22] 惠爽谋, 花银群, 李志宝. 均匀与混合蛾眼结构减反射性能的模拟[J]. *光学学报*, 2019, 39(4): 0416003.
Hui S M, Hua Y Q, Li Z B. Simulation of anti-reflection properties of uniform and hybrid moth-eye structures[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(4): 0416003.
- [23] 兰俊, 陈劲松, 肖志刚, 等. 一种宽波段减反的新型苞状蛾眼结构模拟研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(14): 1416001.
Lan J, Chen J S, Xiao Z G, et al. Simulation of broadband anti-reflective and bud-shaped moth-eye structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(14): 1416001.
- [24] Stavenga D G, Foletti S, Palasantzas G, et al. Light on the moth-eye corneal nipple array of butterflies[J]. *Proceedings of the Royal Society B*, 2006, 273(1587): 661-667.
- [25] Yamada K, Umetani M, Tamura T, et al. Antireflective structure imprinted on the surface of optical glass by SiC mold[J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(7): 4267-4270.
- [26] Song Y M, Jang S J, Yu J S, et al. Bioinspired parabola subwavelength structures for improved broadband antireflection[J]. *Small*, 2010, 6(9): 984-987.

Design and Analysis of Cone-like Structures for Broadband and Wide-Angle Antireflection Enhancement

Yin Jingbo¹, Yan Huangping^{1,2*}, Cao Shengzhu³, Zhou Rui¹, Wang Zijun¹, Li Yuanzhe¹

¹*School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China;*

²*Shenzhen Research Institute of Xiamen University, Shenzhen 518000, Guangdong, China;*

³*Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, Gansu, China*

Abstract

Objective Reflection, transmission, and absorption are several forms of interactions between light and matter. The reflected light caused by the refractive index difference between different media results in low energy conversion efficiency and signal interference. Therefore, reducing broadband reflection to improve transmission or absorption is crucial for improving the performances of optical components and optoelectronic devices. Currently, the main methods to achieve antireflection are the thin-film and micro-nano structure methods. However, a single-layer antireflection film can only act at a specific wavelength, whereas the material selection of a multilayer antireflection film is difficult. Simultaneously, the film thickness is strictly controlled, and there are certain thermal mismatch and mechanical stability problems among the multiple layers. Research on the micro-nano structure methods concentrates on the subwavelength antireflection structure, which is an ordered micro-nano periodic structure that can be equivalent to a dielectric layer with a gradual refractive index to eliminate refractive index mismatch. At present, research on subwavelength antireflection structures mostly focuses on adjusting the size parameters and distribution forms of existing geometric structures, such as cylinder, cone, and moth-eye structures. The optimal value is a special case for such structures. Alternatively, an improved structure is directly proposed based on the original structure, and its antireflection ability is compared with that of the original structure to prove its superiority. Both methods are based on the analysis of specific situations; therefore, proposing a general design method is useful for expanding the potential application of subwavelength antireflection structures.

Methods The antireflection ability of different subwavelength structures is related to the forms of their equivalent refractive indices. In contrast to the above two methods, this study investigates the relationship between the equivalent refractive index of the subwavelength structure and antireflection performance. An equivalent refractive index expression with optimal antireflection

performance is obtained. The equivalent refractive index can satisfy the expected expression when combined with geometric modeling, and the design requirements of a new structure with optimal antireflection performance in broadband can be achieved. In this study, the equivalent refractive indices of the cylinder, cone, and moth-eye structures are obtained using the equivalent medium theory. The reflectance curves of the three structures are obtained using the finite-difference time-domain (FDTD) method. According to the simulation results, the performance of antireflection is best when the equivalent refractive index curve is closest to the linear transition and there is no abrupt change at the top and substrate. To further improve the broadband antireflection of the subwavelength structure, a design method for the geometric structure and distribution form of a subwavelength structure that meets the ideal equivalent refractive index curve is investigated. The relationship between the equivalent refractive index and filling factor of the subwavelength structure is studied using a graphic method, and a single subwavelength structure whose equivalent refractive index is closest to the linear change is established by structural parameter control through three-dimensional modeling. Subsequently, a subwavelength array structure with no abrupt refractive index change at the top and substrate is obtained by adjusting its distribution form. Based on this, a cone-like structure design method with an ideal equivalent refractive index curve that meets the above two requirements is proposed.

Results and Discussions The triangular, tetragonal, and hexagonal pyramid structures that meet the design requirements are selected and compared with the moth-eye structure to verify the antireflection ability. The reflectances of four structures with the same size are compared using the FDTD method in the wavelength range of 300–1100 nm. Specifically, the diameters of the inscribed circles at the bottom of the microstructure are 200, 300, and 500 nm, and the aspect ratios are 1.0, 1.5, 2.0, and 2.5. The reflectances of the three structures are lower than that of the moth-eye structure when the aspect ratios are 1.5, 2.0, and 2.5, respectively (Figs. 9 and 11). All four structures achieve the lowest average reflectance when the aspect ratio is 2.5. Among these structures, the hexagonal pyramid structure exhibits the best antireflection performance (Figs. 9 and 11). When the diameter of the inscribed circle at the bottom of the microstructure is 500 nm and the aspect ratio is 2.5, the optimal average reflectance of the hexagonal pyramid structure (0.029%) is 22.5% of that of the moth-eye structure (0.129%) (Fig. 11). Under other conditions, compared with the optimal reflectance of the moth-eye structure, the average reflectance can still be reduced by nearly 70% (Figs. 9 and 11). Subsequently, two characteristic wavelengths (500 nm and 850 nm) are selected to further investigate the wide-angle antireflection performance of the cone-like and moth-eye structures. Overall, the three cone-like structures have an advantage over the moth-eye structure, among which the average reflectance of the tetragonal pyramid structure is reduced by 62% and 40% under two characteristic wavelengths, respectively (Fig. 12). According to the above results, the cone-like structure has the better antireflection performance.

Conclusions In this study, based on the equivalent medium theory and finite difference time domain method, the equivalent refractive index curve and transition form when the subwavelength structure has the best antireflection performance are proposed. A design method for a series of cone-like structures based on this equivalent refractive index curve is proposed. The average reflectance of the cone-like structure in the wavelength range of 300–1100 nm is reduced by approximately 70% compared with that of the traditional moth-eye structure, with excellent antireflection performance. Meanwhile, the wide-angle antireflection ability of the cone-like structure is better than that of the moth-eye structure at the two selected characteristic wavelengths. The results demonstrate that the cone-like structures designed using this method have better antireflection performance than traditional subwavelength structures. In addition, when combined with advanced manufacturing technology, this design method has potential applications in the fields of ultra-precision optical chips, on-chip optical integration, and optical interconnections.

Key words optical design; antireflection; subwavelength structure; equivalent refractive index; finite-difference time-domain method