

双周期嵌套微结构表面的抗反射特性

沈思彤^{1,2}, 李岩^{3*}, 付跃刚^{1,2}, 欧阳名钊^{1,2}

- (1. 长春理工大学 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;
3. 长春理工大学 科学技术处, 吉林 长春 130022)

摘要: 为提高红外材料光学表面的抗反射能力, 设计了一种具有双周期嵌套式结构抗反射超表面。通过分析在双周期嵌套式结构周围的介电常数 ε 变化情况, 仿真模拟得到反射率。重点分析了当微纳结构发生变化时这种嵌套结构与单一结构表面抗反射特性的差别。通过改变嵌套结构表面占空比、顶端直径比以及长径比等参数仿真模拟, 对抗反射特性进行分析, 最终优化出的结构在 2.4~12 μm 的超宽波长范围内反射率均低于 3.5%, 在中长波实用波段范围内平均反射率低于 1%。这种结构有效地保护了微结构形貌不被破坏, 实现了单一结构抗反射特性效果的叠加, 进一步降低了元件表面的反射率, 可以作为一种新型的减反增透表面应用于红外窗口。

关键词: 双周期嵌套式结构; 蛾眼结构; 抗反射; 超宽波段; 矢量衍射理论

中图分类号: O485; TN305 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0521002

Anti-reflection characteristics of the surface of double-cycle nested micro-structures

Shen Sitong^{1,2}, Li Yan^{3*}, Fu Yuegang^{1,2}, Ouyang Mingzhao^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Optoelectric Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, 130022, China;
3. Science & Technology Department, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to improve the anti-reflection ability of the optical surface of infrared materials, an anti-reflection super-surface with a double-cycle nested structure was designed. By analyzing the variation of the dielectric constant ε around the two-cycle nested structure, the reflection efficiency of the double-cycle nested structure was obtained by simulation. The difference between the anti-reflection characteristics of this nested structure and the surface of a single structure was analyzed when the micro structure changed. By changing the surface duty ratio of the nested structure, the diameter ratio of the top and bottom ends, and the aspect ratio simulation, the anti-reflection characteristics of the double-period nested microstructure surface were analyzed, and the double-cycle nesting was finally optimized. The

收稿日期: 2018-12-10; 修订日期: 2019-01-20

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61705018); 引智基地计划(D17017)

作者简介: 沈思彤(1994-), 女, 硕士生, 主要从事仿生光学与微纳光学制造方面的研究。Email: sstcust@163.com

导师简介: 李岩(1972-), 女, 副研究员, 硕士, 主要从事微纳光学方面的研究。Email: liyan@cust.edu.cn

structure could effectively improve the anti-reflection effect in the ultra-wide wavelength range of 2.4–12 μm, the reflectance was below 3.5%, and the average reflectance was less than 1% in the practical band range of mid-long infrared wave. The structure effectively protects the micro-structure from damage, realizes the superposition of the anti-reflection characteristics of the single structure, further reduces the reflectivity of the surface of the component, and can be applied as a novel anti-reflection surface in the infrared window.

Key words: double periodic nested structure; moth eye structure; anti-reflection; ultra wide spectrum; vector diffraction theory

0 引言

蛾眼微纳结构表面由于其具有良好的抗反射、自清洁等特性获得人们的关注和重视^[1-3]。随着加工工艺的进步,一些较为复杂的抗反射结构表面的加工成为可能并且得到实际应用。然而单一的蛾眼结构形貌对光学结构表面的抗反射性能的调制是有限的^[4-6]。因此,一部分学者对表面结构进行了改进,一般分为两类,一类主要是通过微纳结构与多层膜结合的方法^[7-8]。另一种方法是利用不同微纳结构纵向叠加或嵌套组合的方式排布来提高结构表面的抗反射特性^[9]。其中多级结构在一些参考文献中也称为复合周期结构,是较为常见的一种新型结构,这种多级结构主要依赖于层级间的尺度差异,即不同级别的结构之间,尺度相差越大功能性越突出,此结构一般具有对光散射能力强、光场聚焦效果好、自清洁性能良好等综合优势^[10-11]。然而,这种多级结构随着上层结构的尺寸增加,下层结构的形貌将会被破坏,原有的结构特性将不能保持^[12]。并且随着波长增加到中长波红外宽谱段范围内,该结构的抗反射性能不能满足预期要求。因此,文中提出一种双周期嵌套式结构超表面,能够实现在中长波超宽谱段范围内实现减反增透的效果,在 2.4~12 μm 范围的平均反射率小于 1%。

双周期嵌套式结构,这里简称为嵌套结构,是由两种单一结构基于同一基底平面正交组合分布形成的新的表面复合结构,在不破坏原有单一周期结构形貌的基础上优化结构表面抗反射的性质。这一表面结构的研究能够降低中长波红外双波段窗口的反射率的问题,对实现蛾眼结构在红外光学系统中的应用具有重要意义。

1 双周期嵌套式结构的特性研究

利用微结构在不同周期下对于不同波段的抗反射效果的平移现象,文中假设蛾眼结构的抗反射效果具有可叠加性,将不同周期尺寸的微结构进行嵌套组合,就能够找出最优化的双周期嵌套式结构。

1.1 双周期嵌套式结构模型

嵌套结构可以看作是由不同形式的单一周期结构按照一定规律进行嵌套或组合,其表面结构的影响是可以看作为简单的三维微纳结构的叠加。假设将结构底面中心建立在直角坐标 $O-xyz$ 的原点 $(0,0,0)$ 上,单一圆锥台表面微结构可以表示为:

$$\tan \theta = \frac{h}{R-r} \quad (1)$$

式中: h 为圆锥台高度; R,r 分别为结构的底端半径和顶端半径; θ 为圆锥台结构母线与结构下界面之间的角度。

$$z = \begin{cases} h & (\sqrt{x^2+y^2} \leq r) \\ (R-\sqrt{x^2+y^2}) \cdot \tan \theta & (r < \sqrt{x^2+y^2} < R) \\ 0 & (R < \sqrt{x^2+y^2} < \Lambda) \end{cases} \quad (2)$$

式中: z 为垂直于结构的界面,表示的是结构高度;当 $x,y < r$ 时,取得圆台上端面上的点高度值均为 h 。对于具有周期特性的微结构而言,它的各种形态多为轴对称结构,如圆柱体,圆锥体,抛物线型,高斯型等结构,影响这些曲面面形结构在单个周期内就形貌变化的主要因素是结构半径 ρ 与高度 h 的变化,并且二者依据特定的数学关系形成直线或曲线。因此,可以将单个周期内的表面结构简化表示为 $z(\rho)$ 。

图 1 为研究的圆锥台型双周期嵌套微结构图,周期长度为 $T, T_x=T_y$,较大结构为 A 结构,较小结构为 B 结构,参数均已标出。为了方便计算对其微纳结构

元件进行分区。离散化后微元的介电常数可求,进而通过矢量场叠加的方式得到嵌套结构模型的衍射效率。

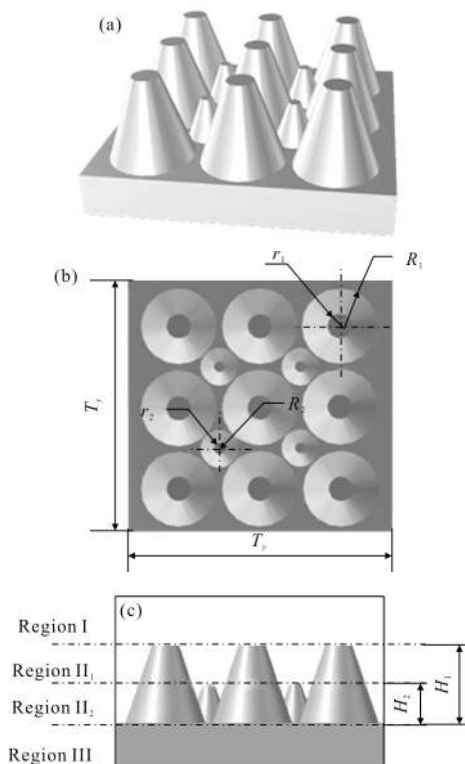


图 1 双周期嵌套微结构结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the double-cycle nested structure

将嵌套结构模型分为四个区域,如图 1(c)所示,其中包括空气介质层 Region I、微结构介质层 Region II 和基底介质层 Region III 三个常规区域,在此基础上针对嵌套结构的模型特性,将 Region II 分为上微结构层 Region II₁, 和下微结构层 Region II₂。针对不同区域内结构形式不同,将嵌套结构模型在 Region II 中沿 x 、 y 、 z 三个方向离散化后,得到三个介质模型分界面处的截面图型如图 2(a)~(c)所示。其中, Δx 、 Δy 、 Δz 分别为嵌套结构离散化后的每个微小单元的数值。

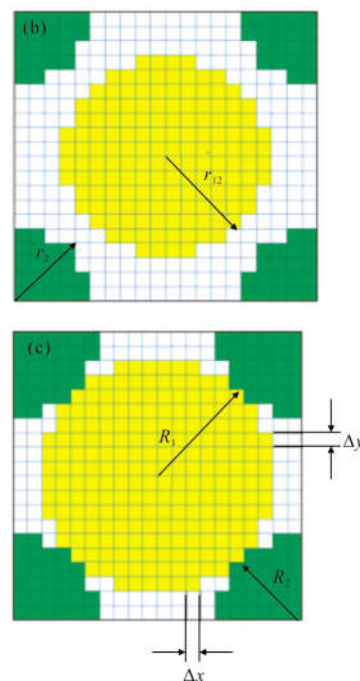
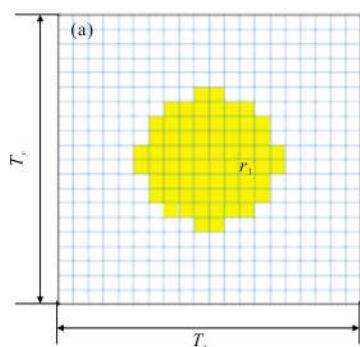


图 2 嵌套结构离散化截面示意图

Fig.2 Cross-sectional schematic of discretized nested structure

令 $f(x,y,z,t)$ 代表电场 E 或磁场 H 在直角坐标系中某一分量,满足如下关系式^[13]:

$$f(x,y,z,t) = f(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = fn(i, k, j) \quad (3)$$

对于双周期嵌套式蛾眼微结构,不同结构分区的介电常数及其倒数都不同。根据所建立的模型 Region II 区域的介电常数可分为以下两种情况:

$$\epsilon_{R_1} = \begin{cases} \epsilon_1, & -T_x/2 < x < -T_x, -T_y/2 < y < -T_y \\ \epsilon_2, & x^2 + y^2 > \rho_1^2 \\ \epsilon_2, & x^2 + y^2 < \rho_1^2 \end{cases} \quad (4)$$

$$\epsilon_{R_2} = \begin{cases} \epsilon_1, & -T_x/2 < x < -T_x, -T_y/2 < y < -T_y \\ \epsilon_2, & x^2 + y^2 > \rho_1^2, (x \pm T_x/2)^2 + (y \pm T_y/2)^2 > \rho_2^2 \\ \epsilon_2, & x^2 + y^2 < \rho_1^2, (x \pm T_x/2)^2 + (y \pm T_y/2)^2 < \rho_2^2 \end{cases} \quad (5)$$

式中: ϵ_1 和 ϵ_2 分别为空气和微结构材料的介电常数; ϵ_{R_1} 和 ϵ_{R_2} 分别为在 Region II₁ 和 Region II₂ 的介电常数表达式; ρ_1 、 ρ_2 分别为当高度为 z 时所对应的圆锥台截面半径,可根据公式(2)解得。因此,离散化后的各微元的介电常数已知,根据矢量衍射理论电场强度 E 和磁场强度 H 可求,进而求得整体结构衍射效率。

1.2 双周期嵌套式结构与单一周期结构抗反射特性的比较

图 3 为嵌套结构与单一结构反射率变化的对比图,其中 S 表示单一结构, C 表示嵌套结构, L 为大结构即 A 结构, $TopD$ 表示 A 结构的顶端直径。在本组仿真中,令 A 结构的占空比均相等,周期尺寸分别为 $3, 3.1 \mu\text{m}$, 并且这里嵌套的 B 结构底端直径为 $1.45 \mu\text{m}$ 。由图 3 所示仿真结果可以得出:嵌套结构的反射率变化形貌与单一周期时反射率变化相似,并且当保证占空比等其他影响参数不变时,仅改变结构周期尺寸,反射率曲线向长波平移;并且在仿真波长区域内反射率的峰值都被明显拉低,从而提高了仿真区域内的抗反射效果。当改变嵌套结构 A 结构的顶端直径时,反射率在仿真波段范围内波动范围明显增加受影响严重,因此在嵌套结构中的反射率变化趋势受 A 结构控制, B 结构为辅助调制结构。

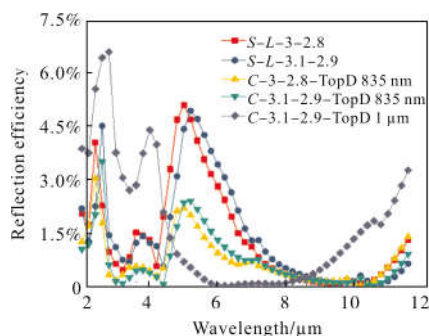


图 3 嵌套结构与单一结构对比图

Fig.3 Comparison chart of nested structure and single structure

1.3 双周期嵌套式结构的外观参数变化对透过率的影响

根据上述单一周期与嵌套结构反射率对比可知:对于嵌套结构而言,其反射率变化总体趋势与 A 结构相仿,因此, A 结构决定嵌套结构的总体抗反射效果, B 结构在嵌套结构中起到辅助调制反射率的作用。因此,在研究嵌套结构的外观变化时主要研究 B 结构的形貌变化对表面反射率的影响。

1.3.1 嵌套结构顶端直径变化对表面反射率的影响

图 4(a)为在嵌套结构中,当改变 A 结构的底端直径时反射率的变化曲线图,其中仿真波长为 $3 \mu\text{m}$ 。当 A 结构的底端直径增加,即 A 结构的占空比增加时,反射率减小。这与单一周期 A 结构的反射率随底端直径变化相一致。其他参数不变的情况下,仅改变

B 结构的底端直径,即改变 B 的占空比。当 B 结构底端直径为 $1.45 \mu\text{m}$ 时取得最大值,因此当 B 结构底端直径减小,即 B 的占空比减小时,嵌套结构的反射率在任意波长范围的情况下均减小。

当改变 B 结构的顶端直径时反射率的变化曲线如图 4(b)所示。由于 A 结构周期尺寸确定在 $3.1 \mu\text{m}$ 的条件下进行仿真求解受到衍射效应的影响,在波长为 $3 \mu\text{m}$ 处存在反射率存在尖峰值。根据图像信息,波长在 $3 \mu\text{m}$ 处的峰值点与 B 结构的顶端直径存在正比关系,随着 B 结构顶端直径的增加,反射率的峰值点逐渐升高,最大差值接近于 3% ,并且在仿真波段范围内顶端直径的变化影响结构反射率的波动情况,顶端直径越大,反射率的波动范围越小,当顶端直径取得 1200 nm 时,能够实现在 $3.2\sim 12 \mu\text{m}$ 的波段范围内反射率均小于 1% 。

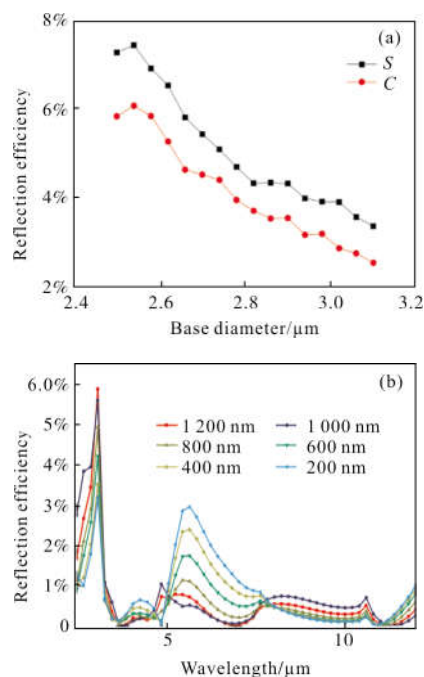


图 4 嵌套结构直径变化反射率曲线

Fig.4 Reflectivity curves of diameter variation of nested structure

1.3.2 嵌套结构长径高度变化对表面反射率的影响

在嵌套结构中 A 结构的高度变化与单一结构变化的仿真结果相一致,因此这里主要讨论在嵌套结构中, B 结构在不同波长情况下高度变化对反射率变化的影响。在中波波段范围内,反射率随高度变化如图 5(a)所示。由于其受到周期边界尺寸的影响,因

此在 3 μm 处不能观察到明显的反射率变化趋势,呈波浪型变化。而在 3.5~5 μm 的波段范围内,反射率在不同波长值下随长径比的增加而降低,并且随着波长的增加反射率的降低效果渐弱。当波长处于长波范围时,反射率曲线如图 5(b)所示。波长在 8.5~10.5 μm 时,反射率随 B 结构高度的增加而增加,当波长大于 10.5 μm 时,反射率随长径比的增加而减小。 B 结构在单一结构情况下,任意仿真波长范围内增加结构的高度,反射率均下降。因此在嵌套结构中 A 结构的高度变化是主要影响表面反射率的因素,但是通过对 B 结构高度的补偿能够抑制由于波长变化等因素引起的反射率峰值的产生,从而保证在仿真波段范围内嵌套结构反射率的平缓变化。

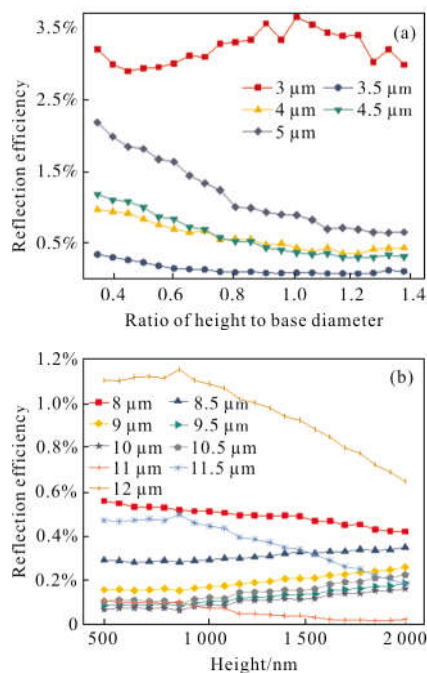


图 5 嵌套结构高度变化的反射率曲线

Fig.5 Reflectivity curves of height variation of nested structure

1.4 双周期嵌套式结构的入射角变化对透过率的影响

通过对嵌套结构入射角度变化的仿真模拟获得结果如图 6 所示。从图像可以得出复合周期结构反射率和透过率在 $0^\circ\sim 10^\circ$ 时,反射率低于 3.5%,最低点处可达 0.08%。当入射角度增加时在 $8^\circ\sim 14^\circ$ 取得最佳入射角度,在全部仿真区域内反射率低于 2.15%,此入射角范围内的反射率在仿真波段范围内实现超宽谱段的低反射,在 3.1~5 μm 及 8~12 μm 波段范围反射率最大值小于 1%。随着入射角度的进

一步增加,反射率增加,反射增加的波段范围也随之增加。当入射角增加到 40° 以上时长波红外区域的反射率高于 4%,透过率在 94%左右。因此,双周期嵌套式结构在 $0^\circ\sim 40^\circ$ 范围内均能保证良好的抗反射特性。在光学系统中,当边缘光束入射到光学元件表面时,由于其表面反射率过高,能够接收到的光强有限,因此光学系统的成像质量会受到影响,将双周期嵌套式结构应用于光学系统中作为窗口表面时,能够保证在全视场范围内具有高透过率,使光学系统的像质得到良好的保证。

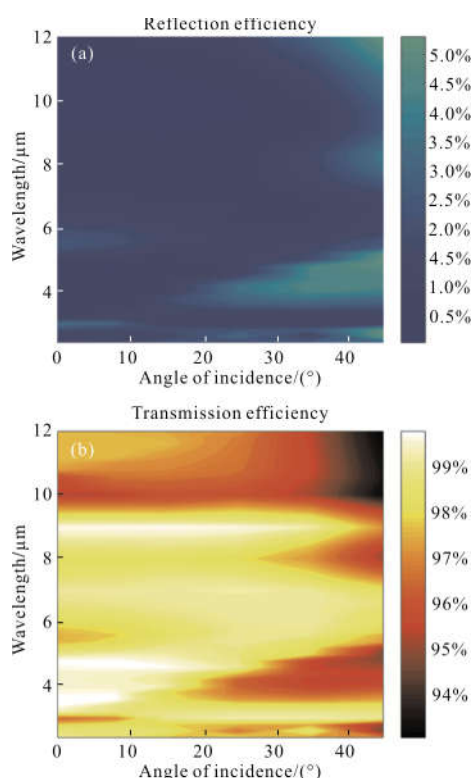


图 6 双周期嵌套式结构入射角反射率及透过率彩色图

Fig.6 Color charts of incidence angle reflectivity and transmittance of double-cycle nested structure

2 结 论

文中提出了一种具有双周期嵌套式结构的抗反射表面,通过分析在双周期嵌套式结构周围的介电常数 ε 变化情况,基于 FDTD 方法仿真计算该模型的衍射效率并进行分析。基于单一周期结构的形貌变化和周期尺寸变化选择出合理的优化结构进行嵌套组合,根据嵌套结构中大、小两种结构的形貌参数变化如顶底端直径比、长径比、占空比,得出嵌套结构表面反射率变化差异,从而获得在更宽波段范围

内的嵌套结构组合, 实现在红外中长波段获得低于1%的抗反射效果, 反射率最小值低于0.1%。根据上述仿真模型设计的嵌套结构表面可以降低中长波红外双波段窗口反射率, 对实现蛾眼结构在红外光学系统中的应用具有重要意义。

参考文献:

- [1] Jiang Hui. Novel method for fabrication anti-reflection coating with "moth-eye" nanostructure and the color of the coated fine-denier polyester fabrics [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2016. (in Chinese)
- [2] Dong Tingting, Fu Yuegang. Design and manufacture of columned antireflective periodic microstructures on the surface of Si substrate [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0622002. (in Chinese)
- [3] Yu Zhaoning, Gao He, Wu Wei, et al. Fabrication of large area subwavelength antireflection structures on Si using trilayer resist nanoimprint lithography and liftoff [J]. *American Vacuum Society*, 2003, 21(6): 2874-2877.
- [4] Takashi Yanagishita, Takahide Endo, Kazuyuki Nishio, et al. Fabrication of silica moth-eye structures by photo-nanoimprinting using ordered anodic porous alumina molds [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2014, 53: 018002.
- [5] Morhard C, Pacholski C, Lehr D, et al. Tailored antireflective biomimetic nanostructures for UV applications[J]. *Nanotechnology*, 2010, 21(21): 425301-425306.
- [6] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402-207405.
- [7] Hao J, Wang J, Liu X, et al. High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(25): 251104.
- [8] Hedayati M K, Javaherirahim M, Mozooni B, et al. Design of a perfect black absorber at visible frequencies using plasmonic metamaterials[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(45): 5410-5414.
- [9] Zhou Lei, Dong Xiaoxuan, Zhou Yun, et al. Multiscale micro-nano nested structures: engineered surface morphology for efficient light escaping in organic light-emitting diodes [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(48): 26989-26998.
- [10] Lalanne Philippe, Morris Michael G. Antireflection behavior of silicon subwavelength periodic structures for visible light[J]. *Nanotechnology*, 1997, 8: 53-56.
- [11] Zhang Chengpeng, Yi Peiyun. Optimization and continuous fabrication of moth-eye nanostructure array on flexible polyethylene terephthalate substrate towards broadband antireflection [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(10): 2901-2907.
- [12] Shigeru Kubota, Kensaku Kanomata. An integrated antireflection design using nanotexture and high-refractive-index glass for organic photovoltaics [J]. *American Coatings Association*, 2017, 14(5): 1209-1224.
- [13] Wang Changqing, Zhu Xili. Finite Difference Time Domain Method in Electromagnetic Field Computation [M]. Beijing: Peking University Press, 1994: 18-47. (in Chinese)
- [14] Liao Tongqing, Wei Xiaolong. Reduction of reflected light from silicon solar cells through spherical optical micro/nano-structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0116001. (in Chinese)
- [15] Guo Xudong, Dong Tingting. Development of bionic moth-eye anti-reflective conical micro-nano structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 091002. (in Chinese)
- [16] Wang Xuefei, Lu Zhenwu. Grating diffractive behavior of surface plasmon wave on meta-surface [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(1): 60-73. (in Chinese)
- [17] Wang Yongjin, Zhang Fenghua. Freestanding non-periodic GaN grating in visible wavelength region [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(12): 3020-3026. (in Chinese)
- [18] Jing Shimei, Zhang Xuanyu. Ultrashort fiber Bragg grating written by femtosecond laser and its sensing characteristics [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 449-454. (in Chinese)