仿生虾蛄眼偏振特性结构研究（简讯）

付跃刚[1,2],朱启凡[1,2,3*],张玉慧[1,2],杨博伟[1,2],刘智颖[1,2],胡 源[1,2]

(1. 长春理工大学 光电工程学院,吉林 长春 130022;
2. 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;
3. 深圳大学 物理与光电工程学院,广东 深圳 518060)

摘 要: 虾蛄眼具有强大的视觉系统，具有多光谱和偏振探测能力。以虾蛄眼微绒毛阵列结构为基础,进行仿生研究。针对偏振探测中的能量利用率以及空间分辨率的问题,仿生虾蛄眼微绒毛阵列结构,研究了孔阵列光子晶体结构,实现偏振滤波与光谱滤波的集成;根据虾蛄眼微绒毛具有光谱滤波及光信号吸收特性,以纳米线栅为仿生结构基础,实现偏振、光谱吸收特性的集成;依据虾蛄眼双向微绒毛阵列结构,以正交纳米线栅为仿生结构基础,实现单位像元的双向偏振吸收。

关键词: 虾蛄眼; 微绒毛; 纳米线栅; 偏振
中图分类号: O436.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0827001

Research on the polarization structures inspired by mantis shrimp eyes (*Newsletter*)

Fu Yuegang[1,2], Zhu Qifan[1,2,3*], Zhang Yuhui[1,2], Yang Bowei[1,2], Liu Zhiying[1,2], Hu Yuan[1,2]

(1. School of Opto-electronic, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Key Laboratory of Opto-electronic Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
3. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: Mantis shrimp eyes have a powerful vision system with multi-spectrum and polarization detection capabilities. Bionic studies were carried out based on the microvilli arrays structure of mantis shrimp eyes. For the problems of energy utilization and the spatial resolution in the polarization detection, the structure of micro-villi array of bionic mantis shrimp eyes was studied. The structure of aperture array photonic crystal was studied to realize the integration of polarization filtering and spectral filtering. According to the spectral filtering and absorbing characteristics of the microvilli array, the bionic structure based on the nano wire grids was researched on, which can absorb spectrum and polarization at the same time. Based on the microstructure with orthogonal microvilli of rhabdom in mantis shrimp eyes, the orthogonal nano wire grids was used as the basis of the bionic structure to realize the unit pixel bidirectional polarization absorption.

Key words: mantis shrimp eyes; microvilli; nano wire grid; polarization

收稿日期: 2019-07-05; **修订日期:** 2019-08-10

作者简介: 付跃刚(1972-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事复杂光学系统设计及装调与仿生光学技术方面的研究。Email:Fuyg@cust.edu.cn

通讯作者: 朱启凡(1991-),男,博士,主要从事仿生光学技术及偏振成像方面的研究。Email:18584369262@163.com

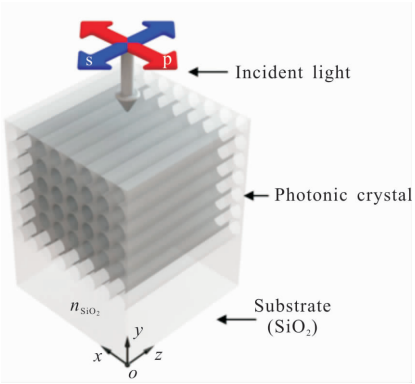
0 引 言

虾蛄眼具有最复杂的结构和最强大的视觉功能[1],可以实现单目立体视觉、多通道光谱偏振成像、圆偏振光探测等功能。利用虾蛄眼的结构特性以及偏振光谱结合的光学特性进行仿生研究，可应用于癌症的诊断与预测、汽车自动驾驶、水下探测成像以及偏振元件的设计制造等诸多领域[2-3],因而对虾蛄眼的仿生研究逐渐成为研究热点。

虾蛄眼偏振光谱特性实现的关键结构是小眼中的感杆束结构,其中的微绒毛结构、尺寸以及微绒毛阵列结构具有光谱滤波、光谱探测以及偏振探测的能力。因此,虾蛄眼的仿生研究对偏振、光谱设备以及光学元件等多领域的集成化、小型化具有重要意义。

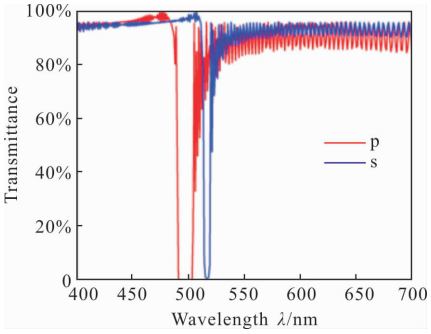
1 仿生偏振光谱滤波结构

虾蛄眼的微绒毛阵列结构具有偏振光谱滤波特性，而微绒毛阵列的管阵列构成具有周期性结构与周期性膜系类似,易实现光谱和偏振特性。因此提出了一种仿生孔阵列光子晶体结构(图 1(a)),实现偏振光谱陷波滤波[4]。s 偏振和 p 偏振方向均可以等效为周期性膜系结构,构成陷波滤波特性。而孔阵列结构使 s 偏振与 p 偏振对应的等效折射率产生差异,使 s 波与 p 波的陷波中心分离(图 1(b)),从而实现偏振光谱滤波的集成。通过改变孔形状、周期以及阵列层数可以实现陷波中心、陷波带宽、截止深度等偏振陷波特性的调控。与一般采用膜系实现陷波滤波的结构相比，减少了材料种类并且可以获得更加精确的折射率变化。



(a) 孔阵列光子晶体结构

(a) Hole array photonic crystal structure



(b) 偏振陷波滤波曲线

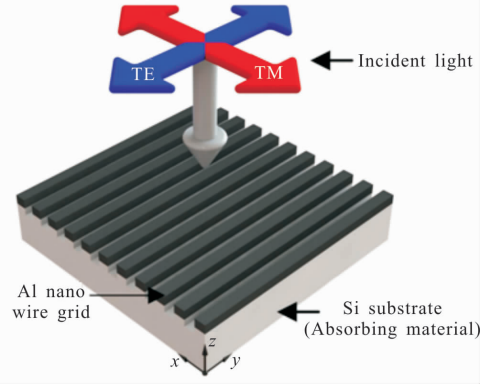
(b) Curve of polarization notch filtering

图 1 仿生偏振光谱滤波结构

Fig.1 Bionic polarization spectral filtering structure

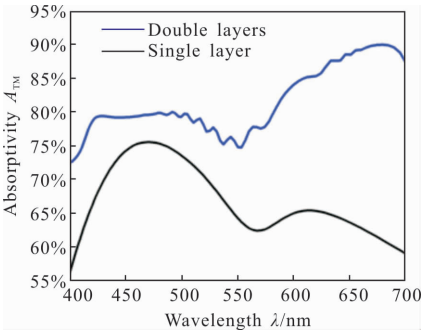
2 仿生偏振探测集成结构

虾蛄眼微绒毛同时具有偏振滤波、光谱滤波以及光电信号转化特性，并且微绒毛阵列结构类似于线栅，因此可以把微绒毛阵列看作一个偏振滤波与探测的集成元件。针对现有偏振集成探测结构存在吸收率与消光比之间的矛盾，仿生设计了一种由光电转换材料硅构成的光栅结构与铝纳米线栅结构集成的双层偏振探测结构(图 2(a))。双层结构相比于



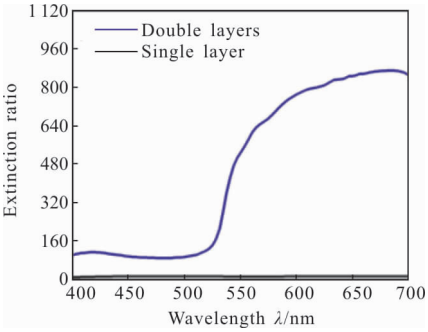
(a) 双层纳米线栅结构模型

(a) Double-layer nano wire grid structure model



(b) 偏振吸收方向(TE)吸收率曲线

(b) Absorptivitiy curve of TE polarization absorption direction



(c) 消光比曲线

(c) Extinction ratio curve

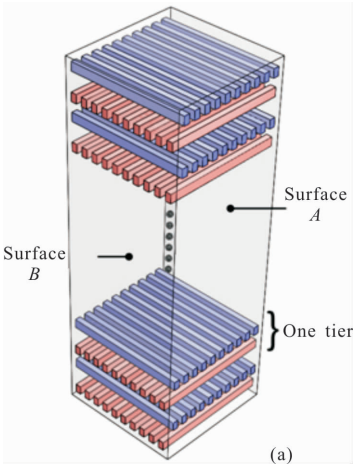
图 2 仿生偏振探测集成结构

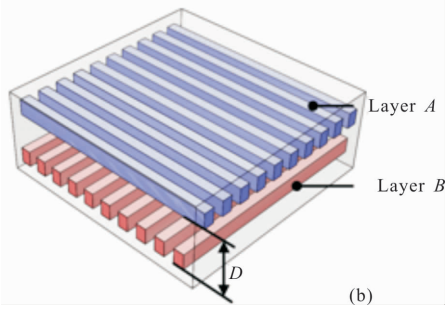
Fig.2 Bionic integrated structure of polarization detection

铝纳米线栅与硅探测其集成结构[5],可以通过减少集成结构反射和降低铝纳米线栅偏振滤波带来的损耗有效提高偏振吸收方向(TE)吸收率(图 2(b)),抑制非吸收方向(TM)吸收率,大幅度提高了偏振集成结构的消光比(图 2(c))。

3 仿生双向偏振探测结构

分焦平面偏振探测系统中，采用 stokes 矢量法对一个物点的探测需要采用四个不同透光方向的偏振元件和探测像元对应组合，导致探测平面空间分辨率损失以及位置误差。虾蛄眼感杆束中的正交微绒毛阵列结构，可以吸收平行于微绒毛方向的线偏振光,即对两个相互垂直的偏振分量敏感。因此,基于正交微绒毛阵列,利用正交线栅构建如图 3(a)所示仿生模型[6],互相垂直的两层线栅分别针对互相垂直方向的线偏振光进行探测(图 3(b))。小占空比线栅实现高吸收消光比,而多层正交结构可以提高





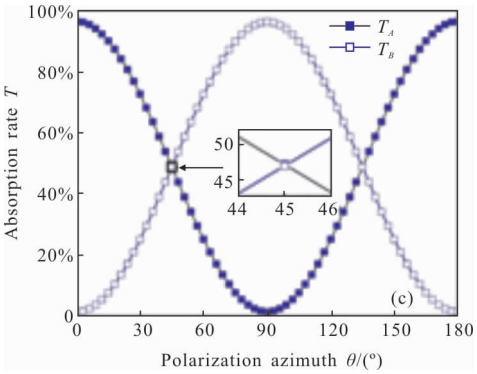


图 3 (a) 仿生双向偏振探测结构;(b) 单元正交线栅结构;(c) 偏振吸收率随偏振方位角变化

Fig.3 (a) Bionic bidirectional polarization detection structure; (b) cell orthogonal wire grid structure; (c) polarization absorption rate varies with polarization azimuth

两个偏振方向的吸收，从而获得随着偏振方位角的变化获得良好的偏振吸收率变化(图 3(c)),实现在单位面积内对两个正交方向的偏振光进行吸收，有助于提高空间分辨率,减小位置误差。

4 结 论

虾蛄眼的仿生结构可以集成光谱偏振特性,提升偏振探测系统的探测能力。因此,对虾蛄眼的仿生研究是意义深远的。

虾蛄眼功能特性不仅仅局限于偏振光谱特性,微绒毛结构还具有宽光谱消色差四分之一波片功能,尾鳍和触角反射光具有线偏振、圆偏振以及光谱特性。因此,对虾蛄的偏振机理研究,有许多工作尚需进一步研究，以期待获得更多新的探测原理和新型器件。

参考文献:

[1] Marshall N J, Land M F, King C A, et al. The compound eyes of mantis shrimps (Crustacea, hoplocarida, stomatopoda)

I. Compound eye structure: The detection of polarized light [J]. ***Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences***, 1991, 334(1269):33-56.

[2] Missael G, Christopher E, Radoslav M, et al. Bio-inspired color-polarization imager for real-time in situ imaging [J]. ***Optica***, 2017, 4(10): 1263-1271.

[3] Garcia Missael, Davis Tyler, Blair Steven, et al. Bioinspired polarization imager with high dynamic range [J]. ***Optica***, 2018, 5(10): 1240-1246.

[4] Zhu Qifan, Fu Yuegang, Liu Zhiying. Narrow-band polarization notch filtering of visible light spectra based on photonic crystal with periodic rectangular holes [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2018, 38(12): 1223001. (in Chinese)

[5] Zhu Qifan, Fu Yuegang, Liu Zhiying, et al. Integrated structure of polarization detection in the visible spectrum based on double wire grids [J]. ***Journal of Nanophotonics***, 2018, 12(3): 036010.

[6] Zhu Qifan, Fu Yuegang, Liu Zhiying. A bio-inspired model for bidirectional polarisation detection [J]. ***Bioinspiration & Biomimetics***, 2018, 13: 066002.