

偏振态对三光束激光干涉分布的影响

吴 晓

浙江外国语学院科学技术学院, 浙江 杭州 310012

摘要 多光束激光干涉技术已经广泛地应用到制作大面积的周期性结构。制作材料也从无机材料扩展到了有机材料。根据多光束干涉理论,模拟三光束激光发生干涉后的强度分布;在不改变入射角的条件下,仅通过调整偏振态组合得到二维“蜂窝”型(S-S-S, P-P-P)和“介质柱”型(C-C-C)周期性结构。同时,由于有机材料对于光偏振态的响应性质,对于干涉后偏振态的分布情况也进行了分析,发现在一个维格纳-赛兹(Wigner-Seitz)原胞中,线偏振组合干涉后得到的偏振态不是线偏振,而是出现线偏振到椭圆偏振再到圆偏振的变化。

关键词 几何光学; 激光干涉; 偏振态组合; 干涉强度和偏振态; 周期性结构; 维格纳-赛兹原胞

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1012002

Influence Study of Polarization on Three-Beam Interference

Wu Xiao

Science and Technology Institute, Zhejiang International Studies University, Hangzhou, Zhejiang 310012, China

Abstract Multi-beam interference technique has been widely used to fabricate large-scale periodic structures. The materials also extend from inorganic to organic. According to the interference theory, we simulate the intensity distribution of three-beam interference. With the same incident angle, we realize two dimensional ‘air-hole’ (S-S-S, P-P-P) and ‘dielectric-cylinder’ (C-C-C) periodic structures only by changing the polarization configuration of interference beams. Meanwhile, because the organic materials have response properties to the polarization of light, we also analyze the interference polarization distribution. And we find that in one Wigner-Seitz cell, the linear polarization configuration results to the periodic polarization distribution: from linear polarization, to elliptic polarization, to circular polarization, instead of linear polarization.

Key words geometric optics; laser interference; polarization configuration; interference intensity and polarization; periodic structure; Wigner-Seitz cell

OCIS codes 080.1753; 090.2880; 120.4610; 350.4238

1 引 言

近年来,微纳周期性结构在光电子领域得到了广泛应用,例如光子晶体,滤光片,光波导等^[1-6]。目前,微纳周期性结构的制作方法包括了激光束直写方法,X射线光刻,深度紫外(UV)光刻,以及激光干涉技术等^[7-13]。与其他技术相比,多光束激光干涉技术具有可以在短时间内实现大面积,均匀的周期性结构等优势。激光干涉技术是采用多束相干光的干涉现象,从而形成空间上周期性变化的干涉图案。理论上,根据干涉光束的数目不同,可以获得一维到三维的周期性结构:双光束一次曝光可以得到任意周期的一维结构;二维周期性结构可以由双光束两次曝光或者三光束和四光束一次曝光得到;同理,多光束多次曝光可以实现任意的三维周期性结构。值得注意的是,在特定的设置下,两次双光束曝光可以由四光束干涉一次曝光来实现。目前为止,双光束和四光束干涉在理论和实验上都得到了广泛的研究^[13-17]。在实验上,为了获得不同的光强结构分布,往往采用双光束的多次曝光技术^[15]。对于三光束干涉技术,只需一次曝光就可以得到二维周期性结构。然而,三光束干涉的实验过程比双光束复杂却有挑战性。吕浩等^[18]研究了三光束干涉时,由于光强和偏

收稿日期: 2015-04-02; 收到修改稿日期: 2015-05-03

作者简介: 吴 晓(1985—),女,博士,讲师,主要从事光电子学模拟,有机材料光学性能方面的研究。

E-mail: xwu@zisu.edu.cn

振的非均匀性,对干涉结构造成影响。同时,熊平等^[19-20]发现,通过改变三光束的偏振组合方式,在磷化镓和锡化锌表面得到不同的微纳米复合结构。由于激光干涉技术应用到一些光敏材料中的时,偏振态将影响着周期性结构的形成^[4]。因此,有必要对三光束干涉进行一个理论性的全面了解。

本文主要介绍基于光强和偏振对称分布的三光束干涉理论,通过应用 Matlab 软件,模拟不同偏振态组合的三光束干涉实现二维周期性强度分布,以及对于干涉后形成的全新偏振态分布进行讨论和分析。

2 三光束干涉理论

如图 1(a)所示为三光束干涉的示意图,三束干涉光均以入射角 θ 角度分别对称的分布在法线周围, $\mathbf{k}_n(n=1, 2, 3)$ 代表每束激光的波矢, α_1 表示波矢为 \mathbf{k}_1 的光束与 x 轴成的旋转角。图 1(b)为三光束干涉后的强度分布,呈现二维周期性结构。 Λ 表示周期,它的大小依赖于入射角 θ 和干涉激光的波长 λ 。由于对称性,任意两束干涉光之间的夹角为 120° 。当第一束激光与 x 轴成的旋转角为 α_1 时,另外两束激光分别与 x 轴成的旋转角为 $\alpha_1 + 120^\circ$ 和 $\alpha_1 + 240^\circ$ 。假设三束光均表示为平面波,它们的电场 $\mathbf{E}_1(\mathbf{r}, t)$, $\mathbf{E}_2(\mathbf{r}, t)$ 和 $\mathbf{E}_3(\mathbf{r}, t)$ 可以表示为

$$\begin{cases} \mathbf{E}_1(\mathbf{r}, t) = \text{Re}\{E_{01} \exp[i(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - \omega t)]\mathbf{e}_1\} \\ \mathbf{E}_2(\mathbf{r}, t) = \text{Re}\{E_{02} \exp[i(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \omega t)]\mathbf{e}_2\}, \\ \mathbf{E}_3(\mathbf{r}, t) = \text{Re}\{E_{03} \exp[i(\mathbf{k}_3 \cdot \mathbf{r} - \omega t)]\mathbf{e}_3\} \end{cases} \quad (1)$$

式中 ω 表示频率,且它们的初始相位均为 0, $\mathbf{k}_n(n=1, 2, 3)$ 表示波矢, \mathbf{r} 为在干涉区域的位置矢量, $E_{0n}(n=1, 2, 3)$ 为每束光的电场幅度, $\mathbf{e}_n(n=1, 2, 3)$ 为对应光的偏振态单位矢量。干涉后总电场的分布为

$$\mathbf{E}_T(\mathbf{r}, t) = \text{Re}\{[E_{01} \exp(i\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r})\mathbf{e}_1 + E_{02} \exp(i\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r})\mathbf{e}_2 + E_{03} \exp(i\mathbf{k}_3 \cdot \mathbf{r})\mathbf{e}_3] \exp(-i\omega t)\}. \quad (2)$$

因此,干涉后的强度分布可以表示为

$$\begin{aligned} I_T &= \langle \mathbf{E}_T^* \cdot \mathbf{E}_T \rangle_t \propto \\ & \sum_{n=1}^3 I_n + \frac{1}{2} \sum_{\substack{n, m=1 \\ (n > m)}}^3 E_{0n} E_{0m} \text{Re}\{\exp[i(\mathbf{k}_n - \mathbf{k}_m) \cdot \mathbf{r}] \mathbf{e}_m^* \cdot \mathbf{e}_n + \exp[i(\mathbf{k}_m - \mathbf{k}_n) \cdot \mathbf{r}] \mathbf{e}_n^* \cdot \mathbf{e}_m\}. \end{aligned} \quad (3)$$

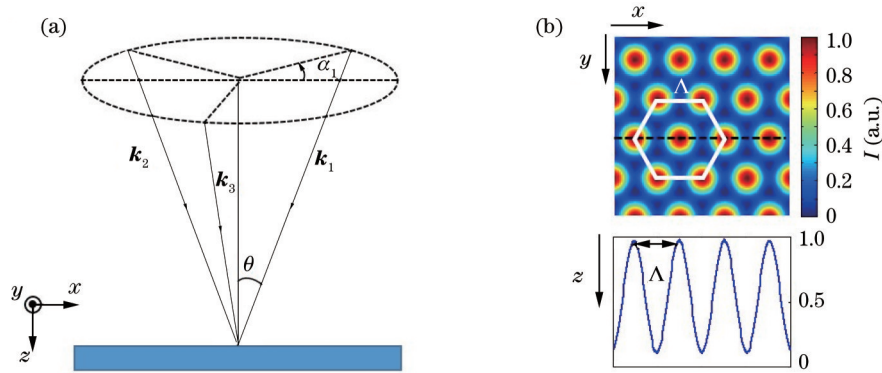


图 1 (a) 三束激光干涉示意图; (b) 在 xy 平面(上)和 xz 平面(下)干涉强度分布

Fig.1 (a) Schematic of three-beam interference; (b) intensity distributions on xy -plan (top) and on xz -plan (bottom)

3 干涉强度和偏振态分布

3.1 干涉强度分布

为了进一步计算(3)式,这里,引入琼斯(Jones)矩阵 (J_n) 来描述干涉光束的偏振性质(如表 1 所示)。其中 s -偏振表示光的偏振方向是垂直于入射光和法线所组成的入射面;而当偏振方向与入射面平行的时候表示为 p -偏振;RC-和 LC-偏振分别表示为右圆偏振和左圆偏振。由于光束沿着 z 轴,即初始波矢可表示为 $\mathbf{k}_0 = (0 \ 0 \ 1)^T$ 。应用旋转矩阵

$$\mathbf{R}(\theta_n, \alpha_n) = \begin{pmatrix} \cos \alpha_n \cos \theta_n & -\sin \alpha_n & \cos \alpha_n \sin \theta_n \\ \sin \alpha_n \cos \theta_n & \cos \alpha_n & \sin \alpha_n \sin \theta_n \\ -\sin \theta_n & 0 & \cos \theta_n \end{pmatrix}. \quad (4)$$

可以得到干涉时,每束光的波矢和偏振态的单位矢量分别表达为 $\mathbf{k}_n = \mathbf{R}_n \mathbf{k}_0$ 和 $\mathbf{e}_n = \mathbf{R}_n \mathbf{J}_n$, 式中 θ_n 和 α_n 分别表示第 n 束干涉光的入射角和旋转角。

表1 Jones 矩阵表示沿 z 轴传播的偏振光

Table 1 Jones matrices represent amplitude and phase of electric field, when the light beam travels along z -direction

| | p-polarization | s-polarization | RC-polarization | LC-polarization |
|---------------------------------|---|---|--|--|
| | | | | |
| \mathbf{J}_n (Jones Matrices) | $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ | $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ | $\begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} \\ -i/\sqrt{2} \\ 0 \end{pmatrix}$ | $\begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} \\ +i/\sqrt{2} \\ 0 \end{pmatrix}$ |

根据表2的参数设置,假设三束光均为 s-偏振(即 S-S-S),且 $|\mathbf{k}_1| = |\mathbf{k}_2| = |\mathbf{k}_3| = \mathbf{k}_0$, $E_{01} = E_{02} = E_{03} = A$ 。那么对于不同的光束,把它们对应的参数代入旋转矩阵(4)式,可以得到对应的三束光的旋转矩阵表达式。再算出三束光在旋转后 \mathbf{k}_n 和 \mathbf{e}_n , 最后强度(3)式变为

$$I_T \propto 2A^2 - A^2 \cos\left[\frac{3}{2}(\sin \theta)k_0 y\right] \left\{ \cos\left[\frac{3}{2}(\sin \theta)k_0 x\right] + \cos\left[\frac{3}{2}(\sin \theta)k_0 y\right] \right\}. \quad (5)$$

从(5)式可知,干涉后总光强的分布跟 z 轴无关,同时在 xy 平面内可以得到二维周期性分布的结构。如图2(a1)所示,三束干涉光的入射角均为 $\theta = 18^\circ$, 波长 λ 为 532 nm。根据关系式 $A = \lambda/(1.5 \sin \theta)$, 可以得到周期等于 $1.1 \mu\text{m}$ 。

表2 三束干涉光的入射角 θ_n , 旋转角 α_n 和偏振态 \mathbf{J}_n 的设置($n=1,2,3$)

Table 2 Parameter settings for incident angle θ_n , rotational angle α_n and polarization \mathbf{J}_n

| Parameter | Beam1 | Beam2 | Beam3 |
|----------------|---|---|---|
| θ_n | θ | θ | θ |
| α_n | 0° | 120° | 240° |
| \mathbf{J}_n | $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ | $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ | $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ |

3.2 干涉偏振态分布

考虑其他两种偏振态组合,即线偏振(P-P-P)和圆偏振(RC-RC-RC)组合。它们干涉图样如图2(a2)和(a3)所示。可以看出,图2(a)中所示的结构分布均是对称的六角形结构,且周期相同,但是它们的形状与偏振态组合有关。例如,对于线偏振(S-S-S或者P-P-P)三束光干涉,可以得到“蜂窝”(低强度处)型结构[图2(a1)和(a2)];对于圆偏振(RC-RC-RC),模拟结果如图2(a3)为“介质柱”(高强度处)型结构。类似地,对于LC-LC-LC偏振态组合,同样可以获得“介质柱”型结构。因此,在不需改变干涉的入射角情况下,只要改变干涉光束的偏振态组合便可得到二维同周期不同型的结构。即实验上只需改变三束干涉光的偏振态组合,每做一次曝光,便可以实现不同的二维周期性结构。这不仅可以大大缩短实验时间,也可以提高制作样品的质量。

同时,也对以上三种不同偏振态组合干涉后得到的偏振态分布进行了研究。由于三光束干涉图案的周期性分布,选取二维周期性结构的一个维格纳-赛兹(Wigner-Seitz)原胞(晶格的最小面积单元)进行关于偏振态分布的讨论。图2(b1)~(b2)所示是在 xy 平面内,对应偏振态组合干涉后在一个 W-S 原胞中偏振态的重新分布。可以看出,干涉后的偏振态分布不仅与空间位置有关,而且也依赖于干涉光束的偏振态组合。但是,在每个 W-S 原胞中,偏振态依旧是呈现对称性分布。线偏振组合(P-P-P或S-S-S)的三束光发生干涉后得到的偏振态在一个原胞中的分布是从线偏振到椭圆偏振再到圆偏振。而对于 RC-RC-RC 偏振情况,得到的仍然为圆偏振。此结果与激光双光束干涉后得到的偏振态分布完全不同^[21]。这一特点,要求应用三光束干

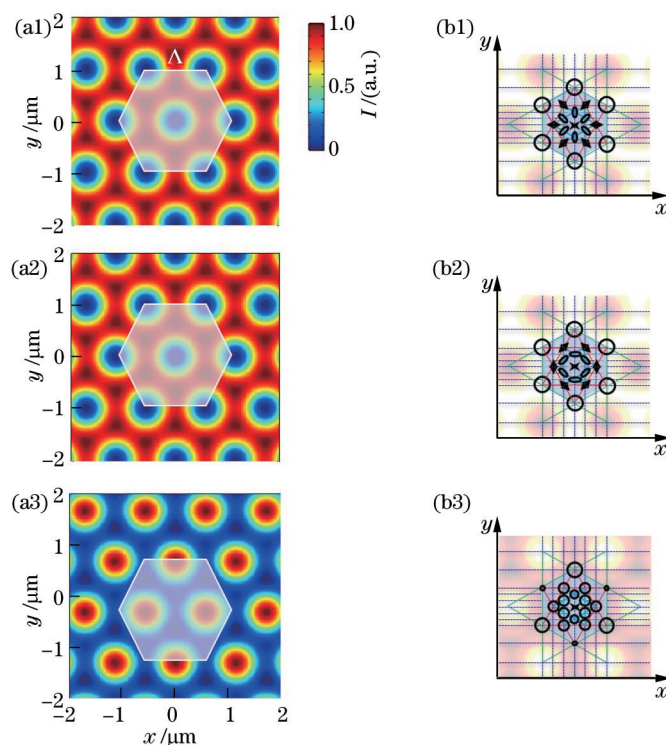


图2 (a1)~(a3)分别为S-S-S,P-P-P和RC-RC-RC不同偏振态组合得到的二维干涉强度分布;(b1)~(b3)分别为对应不同偏振态干涉后得到的一个维格纳-赛兹原胞内的偏振态分布,对应于(a1)~(a3)中以 Δ 为边长的正六边形

Fig.2 (a1)~(a3) Two-dimensional interference intensity distributions with S-S-S, P-P-P and RC-RC-RC polarization configurations, respectively; (b1)~(b3) polarization distributions in one Wigner-Seitz cell, according to different polarization configurations as shown in (a1)~(a3): hexagon with side length Δ

涉技术在光敏材料上实现周期性结构制作时,除了考虑干涉后强度分布外,偏振态的分布也应该得到关注。特别是在将干涉技术应用到偶氮苯聚合物材料上的制作周期性结构时。由于偶氮苯材料的周期性结构制作,是基于该材料的光致质量迁移过程,该过程依赖于干涉光偏振态^[14]。

4 结 论

详细介绍了三光束干涉技术的理论计算过程,通过 Matlab 软件,模拟了三光束干涉在不同偏振态的组合(S-S-S,P-P-P,RC-RC-RC)情况下,只需要一次曝光便可得到不同型的二维周期性结构。其中线偏振组合可以得到二维“蜂窝”型结构;圆偏振组合可以实现二维“介质柱”型结构。同时,分析了干涉后偏振态的分布。由于结构分布的对称性,在干涉图样中提取一个 Wigner-Seitz 原胞,并且对原胞中不同位置的偏振态进行分析。结果表明,每个原胞中的偏振态依旧是对称性分布。但是,这些偏振态却跟空间位置和干涉光的偏振态组合相关。对于线偏振组合,在一个原胞中,它们的偏振态从线偏振到椭圆偏振再到圆偏振变化;而圆偏振组合的干涉得到的依旧是圆偏振分布。关于三光束干涉的光强和偏振态的理论模拟,能为今后三光束激光干涉技术在实验应用上提供一定的理论依据。特别是关于偏振态的分布的讨论,有助于研究光敏材料对于光偏振响应的性质。

参 考 文 献

- 1 Inoue K, Ohtaka K. Photonic Crystals: Physics, Fabrication and Applications[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2004.
- 2 Goldenberg L M, Lisinetskii V, Gritsai Y, *et al.*. Second order DFB lasing using reusable grating inscribed in azobenzene-containing material[J]. Optical Materials Express, 2012, 2(1): 11-19.
- 3 Zhang Xinyu, Tang Qingle, Zhang Zhi, *et al.*. Fabrication of DNA chip template by using photo lithography and ion beam etching techniques[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(1): 129-133.

张新宇, 汤庆乐, 张 智, 等. 用光刻及离子束刻蚀技术制作 DNA 芯片模板[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(1): 129-133.

- 4 Goldenberg L M, Gritsai Y, Kulikovska O, *et al.*. Three-dimensional planarized diffraction structures based on surface relief gratings in azobenzene materials[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(12): 1309-1311.
- 5 Zhou Xingping, Shu Jing, Lu Binjie, *et al.*. Two-wavelength division demultiplexer based on triangular lattice photonic crystal resonant cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0123001.
周兴平, 疏 静, 卢斌杰, 等. 基于三角晶格光子晶体谐振腔的双通道解波分复用器[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0123001.
- 6 Liu Qineng. Interference theory of the defect mode in one-dimensional doped photonic crystal[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(8): 0806001.
刘启能. 一维掺杂光子晶体缺陷模的干涉理论[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0806001.
- 7 Ebendor-Heidepriem H. Laser writing of waveguides in photosensitive glasses[J]. *Opt Mater*, 2004, 25(2): 109-115.
- 8 Romanato F, Businaro L, Fabrizio E D, *et al.*. Fabrication by means of X-ray lithography of two dimensional GaAs/AlGaAs photonic crystals with an unconventional unit cell[J]. *Nanotechnol*, 2002, 13(5): 644-652.
- 9 Bogaerts W, Wiaux V, Taillaert D, *et al.*. Fabrication of photonic crystals in silicon-on-insulator using 248-nm deep UV lithography[J]. *IEEE J Select Topics Quantum Electron*, 2002, 8(4): 928-934.
- 10 Xuan M D, Dai L G, Jia H Q, *et al.*. Fabrication of large-area nano-scale patterned sapphire substrate with laser interference lithography [J]. *Optoelectron Lett*, 2014, 10(1): 51-54.
- 11 Zhang Wei, Liu Weiping, Gu Xiaoyong, *et al.*. Lithography pattern by multiple beam laser interference[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(12): 3157-3162.
张 伟, 刘维萍, 顾小勇, 等. 多光束激光干涉光刻图样[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(12): 3157-3162.
- 12 Liu Dandan, Wang Yong, Ye Zhen, *et al.*. Grating fabrication of 808 nm distributed feedback semiconductor laser by holographic photolithography[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(2): 0202008.
刘丹丹, 王 勇, 叶 镇, 等. 全息光刻制备 808 nm 分布反馈半导体激光器的光栅[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0202008.
- 13 Zhang Heng, Zhou Yun, Fang Zhongbao, *et al.*. Fabrication of micro-grating structure on glazed stainless-steel by nanosecond laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(3): 448-451.
张 恒, 周 云, 方宗豹, 等. 用纳秒激光在镜面不锈钢表面刻蚀微光栅结构[J]. *中国激光*, 2008, 35(3): 448-451.
- 14 Wu X, Nguyen TTN, Ledoux-Rak I, *et al.*. UV beam-assisted efficient formation of surface relief grating on azobenzene polymers[J]. *Appl Phys B*, 2012, 107(3): 819-822.
- 15 Lai N D, Liang W P, Lin J H, *et al.*. Fabrication of two- and three dimensional periodic structures by multi-exposure of two-beam interference technique[J]. *Opt Express*, 2005, 13(23): 9605-9611.
- 16 Wang D P, Wang Z B, Zhang Z, *et al.*. Effects of polarization on four-beam laser interference lithography[J]. *Appl Phys Lett*, 2013, 102(8): 081903.
- 17 Zhang J J, Wang Z B, Di X, *et al.*. Effects of azimuthal angles on laser interference lithography[J]. *Appl Opt*, 2014, 53(27): 6294-6301.
- 18 Lü Hao, Wang Shouzhi, Wang Xia. Influence study of inhomogeneous beam intensity and polarization to holographic interference structure by computer simulation[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1009001.
吕 浩, 王守智, 王 霞. 计算机模拟光强与偏振态非均匀性对全息干涉结构的影响[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1009001.
- 19 Xiong Pingxin, Jia Xin, Jia Tianqing, *et al.*. Two-dimensional complex nano-micro patterning on GaP and ZnSe surface created by the interference of three femtosecond laser beams[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(1): 311-316.
熊平新, 贾 鑫, 贾天卿, 等. 三光束飞秒激光干涉在 GaP, ZnSe 表面诱导二维复合纳米-微米周期结构[J]. *物理学报*, 2010, 59(1): 311-316.
- 20 Xiong Pingxin. Complex Micro/Nanostructures on Semiconductor Surfaces Induced by the Interference of Three Femtosecond Laser Beams and the Investigations on Their Photoluminescence Properties[D]. Shanghai: East China Normal University, 2012: 21-123.
熊平新. 三光束飞秒激光干涉在半导体表面诱导复合微/纳米周期结构及其光学特性研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2012: 21-123.
- 21 Wu X, Nguyen T T N, Ledoux-Rak I, *et al.*. Holography - Basic Principles and Contemporary Applications[M]. Croatia: Intech, 2013: 147-170.

栏目编辑: 何卓铭