

·测试、试验与仿真·

## 基于热极化双孔光纤的电调谐光纤光栅

郭 燕,任国斌,黄 琳

(北京交通大学 全光网与现代通信网教育部重点实验室,北京 100044)

**摘要:**基于热极化光纤设计了电调谐光纤布拉格光栅。通过光纤热极化二维载流子模型分析了热极化致内建电场的形成。结合紫外光在热极化光纤二阶非线性周期性擦除以及在光纤光栅制作中的作用,设计了周期性极化的布拉格光纤光栅。研究表明,利用非线性擦除区域与非线性区域电致折射率改变的不同,调节光栅的折射率差,可以实现电调谐光纤光栅。针对电调谐光纤光栅,研究了一定电压下初始折射率差、光栅长度对反射率的影响。文中结论对于光纤光栅在全光纤器件方面的应用具有重要参考价值。

**关键词:**热极化;光纤光栅;调制

中图分类号:TN386.4

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2015)-06-0075-05

## Research on Electrically Tunable Fiber Bragg Grating Based on Thermally Poled Twin-hole Fiber

GUO Yan, REN Guo-bin, HUANG Lin

(Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** An electrically tunable fiber Bragg grating based on thermally poled twin-hole fiber is designed. The formation of frozen-in electric field during thermal poling is analyzed based on the two-dimensional charge dynamics model. A periodically poled Bragg fiber grating is designed based on the role of ultraviolet light in the second-order nonlinearity (SON) periodically erasing of thermally poled fiber and the fiber grating manufacturing. The tunability is achieved as the variation responses of refractive indices to modulating voltage in SON erased zone and SON zone are different. The influence of the initial refractive index and the length of the grating on the tunability are also investigated. The electrically tunable thermally poled fiber Bragg grating has important reference value for the application of fiber Bragg grating and thermally poled optical fiber in active optical devices.

**Key words:** thermal poling; fiber grating; modulation

玻璃材料具有光传输损耗低、物理特性稳定、价格低廉等特点,使其在光通信领域具有很大的前景。但因其宏观对称性,不存在二阶非线性光学特性,限制了它在非线性领域的应用。通过热极化可以使其产生二阶非线性和电光效应<sup>[1-3]</sup>,目前的极化技术有:电晕极化<sup>[4]</sup>、紫外极化<sup>[5]</sup>、电子注入<sup>[6]</sup>、热极化<sup>[7]</sup>。

其中,热极化是最稳定可靠的技术。早在1991年,R A Myers等人首次使用热极化打破这种结构的对称性,诱导出永久稳定的二阶非线性。热极化过程为在高温(250℃~325℃)环境中,给样品施加3~5 kV电压,极化时间持续几分钟到几个小时。极化之后将光纤样品冷却到室温后,移除电压<sup>[7]</sup>。最

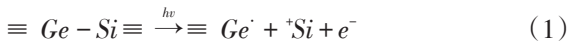
收稿日期:2015-11-30

基金项目:国家自然科学基金(61178008)资助的课题;中央高校基本科研业务费专项基金(2011RC050)资助的课题

作者简介:郭燕(1989-),女,河北省衡水市人,北京交通大学在读硕士,主要研究方向为光纤热极化;导师简介:任国斌(1973-),男,北京交通大学教授,博士研究生导师,主要研究方向为全光交换、特种光纤及器件。

终,在阳极表面形成二阶非线性层,该非线性层形成主要原因是载流子的迁移<sup>[8]</sup>。极化之后,非线性层内形成记录电场 $E_{rec}$ ,该电场与三阶光学非线性极化率 $\chi^{(3)}$ 相互作用形成二阶非线性: $\chi^{(2)}=3E_{rec}\chi^{(3)}$ <sup>[9]</sup>。目前,热极光纤已用于全光纤开关<sup>[10-12]</sup>、二次谐波产生<sup>[13]</sup>、电场检测<sup>[14]</sup>、纠缠光子对产生<sup>[15]</sup>等。

光纤光栅是由于折射率沿光纤长度方向周期性分布,即由于折射率差值 $\Delta n$ 的存在,使其可以对特定波长附近一定带宽内的光具有反射(布拉格光纤光栅)或损耗(长周期光纤光栅)的作用。光纤光栅具有体积小、波长选择性好、极化不敏感、低的插入损耗等优点而成为引人注目的光器件。如其应用于光纤光栅传感器<sup>[16]</sup>、模式转换器<sup>[17]</sup>、滤波器<sup>[18]</sup>、分插复用器<sup>[19]</sup>等。1995年,Fujiwara进行了紫外极化技术与光纤光栅相结合的研究,并实现了基于紫外光极化光纤光栅的电调谐光栅<sup>[20]</sup>,但是紫外极化产生的二阶非线性在室温下寿命很短,其寿命一般只有几个月,且可重复型低。相比于紫外极化,热极化诱导产生的二阶非线性比紫外光极化诱导产生的二阶非线性更可靠、更稳定<sup>[21]</sup>。另外,热极化产生的二阶非线性可利用紫外光擦除。其原理为:紫外光曝光下的掺锗光纤中会形成锗氧缺陷中心,它会吸收波长在240 nm附近的光波并发生如下变化<sup>[22]</sup>,如下式



锗氧缺陷中心会吸收光子释放电子,释放的电子在热极化形成的强反向电场的作用下,电场中的正电荷进而可以与反向电场相抵消,因此二阶非线性被擦除。同时,在紫外光的周期性曝光下,曝光区域的掺锗纤芯层的折射率会发生改变,从而实现光栅制作的目的。

文中结合热极化光纤,利用紫外光在二阶非线性擦除以及光纤光栅制作中的作用,设计了电调谐布拉格光栅,并仿真实现了对于布拉格光栅反射率的调谐。在此基础上,同时研究了初始折射率差、光栅长度对于调谐性能的影响。

## 1 模型及原理

双孔光纤的横截面示意图如图1所示。这里使用的是标准的单模光纤G.652。光纤包层、电极孔及纤芯的半径分别为62.5  $\mu\text{m}$ 、15  $\mu\text{m}$ 、4.1  $\mu\text{m}$ ,阳极

和阴极与纤芯的边缘之间的距离分别为3  $\mu\text{m}$ 和10  $\mu\text{m}$ 。其中,在波长 $\lambda=1550$  nm时,包层、纤芯折射率分别为1.444、1.449。考虑双孔中内置的电极为金属Ag。电极孔中‘+’代表阳极,‘-’代表阴

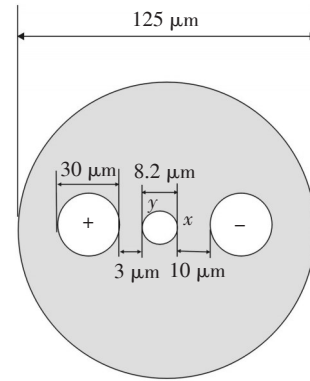


图1 双孔光纤的横截面示意

极。

光纤热极化中的二维载流子模型用局部连续方程和泊松方程表示,如下式所示<sup>[23]</sup>

$$\nabla^2 \Phi = \frac{F}{\varepsilon} \sum_i z_i C_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_i \nabla C_i + z_i \mu_i F C_i \nabla \Phi) = 0 \quad (3)$$

其中, $C_{(x,y,t)}$ 代表载流子的浓度; $\Phi(x,y,t)$ 代表热极化过程中电势的分布; $i$ 代表载流子的种类; $D_i$ 代表载流子的扩散速率; $\mu_i$ 代表载流子的迁移速率; $z_i$ 是载流子的电荷数量; $F$ 是法拉第常数。泊松方程(2)表明,电荷的分布决定电势的分布。局部连续方程(3)中第一项是电荷的瞬态变化,第二项表示电荷的漂移和扩散。

## 2 仿真及结果分析

热极化双孔光纤仿真中,阳极和阴极的电势分别为5 kV、0 V,极化温度为250  $^{\circ}\text{C}$ 。极化后,电极以及光纤外表面设为零电位。极化过程中载流子为 $\text{Na}^+$ 离子和阳极表面空气电离产生的 $\text{H}^+$ 。 $\text{Na}^+$ 离子初始浓度 $C_{\text{Na}^+}=9.5 \times 10^{22}$  ions/ $\text{m}^3$ ,迁移率 $\mu_{\text{Na}^+}=1.5 \times 10^{-15}$   $\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。极化前, $\text{Na}^+$ 载流子均匀分布在双孔光纤中,阳极表面的 $\text{H}^+$ 载流子浓度 $C_{\text{H}^+}$ 设置为常数0.3 mol/ $\text{m}^3$ ,并且在极化过程中空气电离可以产生足量的 $\text{H}^+$ 离子。 $\text{H}^+$ 离子的迁移率 $\mu_{\text{H}^+}$ 为 $2 \times 10^{-18}$   $\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ <sup>[23]</sup>。

图2给出了极化后7 200 s时,双孔光纤横截面上沿 $x$ 方向的电场分布。从图2可以看出,非

线性层在阳极表面产生,并绕阳极环形分布。在  $t=7\ 200\ \text{s}$  时纤芯被非线性层全部覆盖,此时,纤芯中的平均电场强度约为  $2 \times 10^8\ \text{V/m}$ 。非线性层外存在反向电场(从阴极或光纤外表面指向阳极),这是由

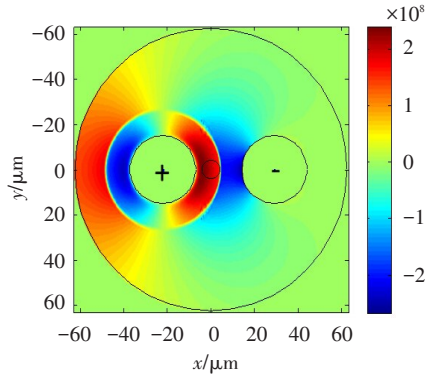


图2 极化后  $t=7\ 200\ \text{s}$  光纤中电场分布

于零电位条件引起的。

紫外光照射该热极化光纤时,会擦除光纤中的二阶非线性,导致非线性擦除区域的  $E_{\text{rec}}=0$ ,而未被擦除的非线性区域的  $E_{\text{rec}}$  不变。同时,紫外光的周期性曝光会形成图3所示的双孔光纤光栅。这里非线性擦除区域用  $L1$  表示,非线性区域用  $L2$  表示,光

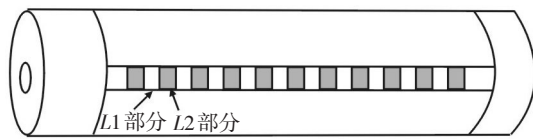


图3 光纤光栅示意图

纤光栅周期为  $536\ \text{nm}$ 。

施加外加电压时, $L2$  的折射率改变为<sup>[24]</sup>

$$\Delta n_2 = \frac{1}{2n} 3\chi^{(3)} (E_{\text{rec}} + E_{\text{ext}})^2 \quad (4)$$

$L1$  的折射率改变为

$$\Delta n_1 = \frac{1}{2n} 3\chi^{(3)} E_{\text{ext}}^2 \quad (5)$$

其中,  $E_{\text{rec}}$  为内建电场;  $E_{\text{ext}}$  为外部电场。当外部电场为0时,光纤折射率的改变为

$$\Delta n(0) = \frac{1}{2n} 3\chi^{(3)} E_{\text{rec}}^2 \quad (6)$$

在外加电压的作用下,非线性区域与非线性擦除区域的有效折射率差为

$$\Delta n(V) = \Delta n'_{\text{eff}} - \Delta n_{\text{eff}}(V) \quad (7)$$

其中,  $\Delta n'_{\text{eff}}$  为式(6)所示,因紫外曝光时非线性擦除区域引起的折射率变化,  $\Delta n_{\text{eff}}$  为式(4)、式(5)所示的外部电场分别在  $L1$  区域、 $L2$  区域引起的有效折射率差,包括内建电场  $E_{\text{rec}}$  以及外加电压产生的电场

$E_{\text{ext}}$ 。

根据式(4)、式(5),图4给出了  $\Delta n_{\text{eff}}$  和外加电压

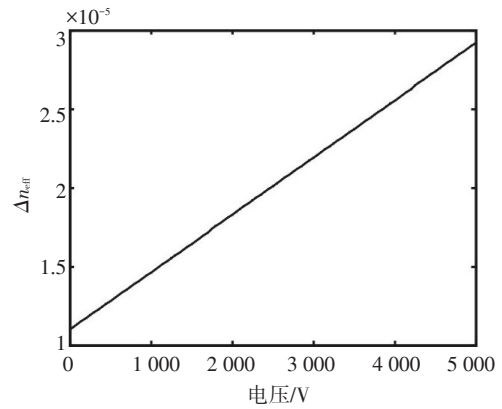


图4 折射率差随外部电压的变化

的关系。

由图4可以看出,外加电压为0时,  $\Delta n_{\text{eff}}$  为  $1.09 \times 10^{-5}$ ,这是由内建电场为  $E_{\text{rec}}$  引起的有效折射率差。随着外加电压的增大,  $\Delta n_{\text{eff}}$  的值单调递增,外加电压为  $5\ 000\ \text{V}$  时,  $\Delta n_{\text{eff}}=2.91 \times 10^{-5}$ 。根据  $\lambda_b=2n_{\text{eff}}\Lambda$ ,外加电压为  $5\ 000\ \text{V}$  时,中心波长漂移量为  $19.5\ \mu\text{m}$ 。

根据布拉格光纤光栅传输矩阵法,图5给出了不同外加电压下反射率随波长的变化。其中初始

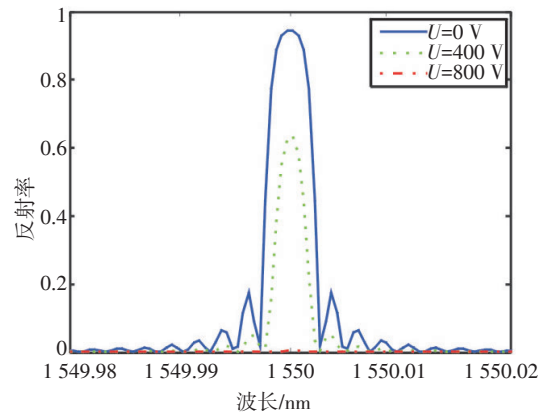


图5 不同外加电压条件下,光纤光栅反射率随波长变化

折射率差  $\Delta n(0)=3 \times 10^{-6}$ ,光栅长  $35\ \text{cm}$ 。

由图5可以看出,随着外加电压的增大,反射率在  $0\sim 800\ \text{V}$  范围内单调递减。在  $0\sim 800\ \text{V}$  范围内,外加电压对中心波长的漂移并无明显影响。图6中点线给出了在相同参数下,  $\lambda=1\ 550\ \text{nm}$  波长反射率随外加电压的变化,随着外加电压的增大,反射率从  $0.945$  降低到  $0.005$ ,此时外加电压  $V=800$ 。外加电压从  $800\ \text{V}$  增大到  $2\ 000\ \text{V}$  时,反射率随之增

大。外加电压在 2 000~3 000 V 范围内变化时,反射率为 0.98 基本保持不变。在电压高于 3 000 V 时,反射率呈振荡形式变化,这是由于折射率变化导致的中心波长的漂移所引起的。

图 6 给出了  $L=35$  cm 时,不同  $\Delta n(0)$  下反射率随外加电压的变化,波长为  $\lambda=1\ 550$  nm。在  $\Delta n(0)=0$  时,反射率在外加电压小于 1 300 V 范围内,随着外加电压的增大而增大。在 1 300~2 850 V,反射率基本保持为 0.995。在外加电压大于 2 850 V 时,由于中心波长的漂移,反射率呈振荡形式变化。随着  $\Delta n(0)$  的增大,初始反射率随  $\Delta n(0)$  的增大而增大,并在一定外加电压范围内,随着外加电压的增大,先减小后增大。而随着  $\Delta n(0)$  的增大,中心波长漂移对反射率

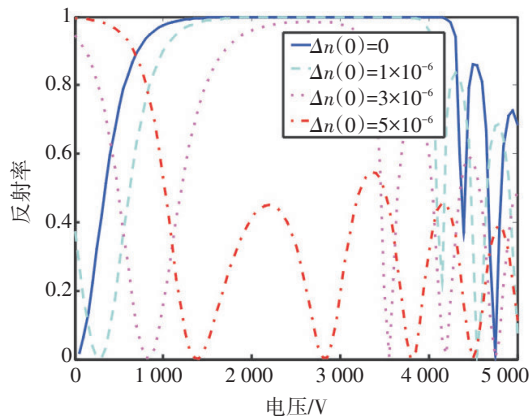


图 6  $L=35$  cm 时,不同  $\Delta n(0)$  条件下反射率随电压变化

的影响也越明显。

图 7 给出了  $\Delta n(0)=0$  时,不同光栅长度下反射率随外加电压的变化,光栅的长度分别为 15 cm、

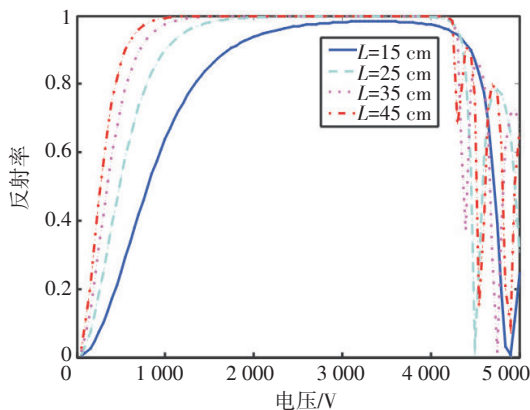


图 7  $\Delta n(0)=0$ ,不同长度  $L$  条件下反射率随电压变化

25 cm、35 cm、45 cm,波长为  $\lambda=1\ 550$  nm。

从图 7 中可以看出,调谐灵敏度随着  $L$  的增大

而增大。随着光栅长度的增大开关电压随之变小。当  $L=45$  cm 时,调谐灵敏度最大时,所需的开关电压为 1 150 V。外加电压为 0 V 时,随着光栅长度的增大,光栅对波长为 1 550 nm 光波的反射增强。 $L=45$  cm 时,外加电压在 0~1 150 V 范围内增大时,该光栅对该波长为 1 550 nm 的光波的反射增强,透射减弱,外加电压在 1 150~4 200 V 范围内增大时,光栅对特定波长光波的反射率基本保持为 1,外加电压大于 4 200 V 时,由于  $\Delta n$  变化引起中心波长的漂移,反射率呈振荡形式变化。

### 3 结 论

提出了基于热极化双孔光纤的电调谐光纤光栅,即基于热极化的光纤,在紫外光的照射下周期性擦除二阶非线性,二阶非线性擦除区域和二阶非线性区域产生折射率差,形成沿光纤长度方向折射率差周期分布的布拉格光纤光栅。由于两区域的电致折射率差,形成电可调谐的光纤光栅。仿真发现,光栅的初始值折射率差一定时,光栅的长度越大,对于特定波长光波其反射率越大,实现开关作用时该光栅的消光比越大,其调谐性能越好。当光栅的长度一定时,随初始折射率差增大,其调谐性能也随之改善,此时所需的开关电压也变大。选择合适的外加电压和初始折射率差值  $\Delta n$  可以使该光栅对该特定波长的光波实现开关的作用。文中的研究对于光纤光栅在全光纤器件方面的应用提供了参考。

### 参考文献

- [1] Kazansky P G, Russell P S J, Takebe H. Glass fiber poling and applications, *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8):1484-1493.
- [2] Long X C, Brueck S R J. Large-signal phase retardation with a poled electrooptic fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(6):767-769.
- [3] CHEN Zhe. Thermally poled PANDA fibre device with microstrip electrode[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(22): 1839-1840.
- [4] 徐建东,刘树田. 熔融石英的电晕极化及其二次谐波产生[J]. *中国激光*, 1996, 9(9):827-831.
- [5] Costantino Corbari. UV poling of pure fused silica by high-intensity femtosecond radiation[J]. *Optical Communica-*

- tion, 2005:311-312.
- [6] Katoh, Ryuzi, Furube A. Electron injection efficiency in dye-sensitized solar cells[J]. *Journal of Photochemistry & Photobiology C Photochemistry Reviews*, 2014, 20(9):1-16.
- [7] Myers R A, Mukherjee N, Brueck S R. Large second-order nonlinearity in poled fused silica[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(22):1732-1734.
- [8] Alley T G, Brueck S, Myers R A. Space charge dynamics in thermally poled fused silica[J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 1998, 242(2):165-176.
- [9] Alley, Thomas G, Brueck S R J, et al. Secondary ion mass spectrometry study of space-charge formation in thermally poled fused silica[J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 86(12):6634-6640.
- [10] Kudlinski A, Quiquempois Y, Martinelli G. Modeling of the  $\phi(2)$  susceptibility time- evolution in thermally poled fused silica[J]. *Optics Express*, 2005, 13.
- [11] Alexandre, Kudlinski, Gilbert M, et al. Time evolution of second-order nonlinear profiles induced within thermally poled silica samples[J]. *Optics Letters*, 2009, 30(9):1039-1041.
- [12] Tarasenko O, Margulis W. Electro-optical fiber modulation in a Sagnac interferometer[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(11):1356-1358.
- [13] Malmström, Tarasenko M O, Margulis W. Pulse selection at 1 MHz with electrooptic fiber switch[J]. *Optics Express*, 2012, 20(9): 9465-70.
- [14] Michie A. Electric field and voltage sensing at 50 Hz using a thermally poled silica optical fibre[J]. *Measurement Science & Technology*, 2007, 18(10):3219-3222.
- [15] Helt L G. Proposal for in-fiber generation of telecom-band polarization- entangled photon pairs using a periodically poled fiberP[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(14):2138-2140.
- [16] 鲍吉龙. 光纤光栅传感器及其应用[J]. *激光技术*, 2004, 24(3):174-179.
- [17] YUAN, Cheng-wei. A novel TEM-TE<sub>11</sub> mode converter [J]. *IEEE Microwave & Wireless Components Letters*, 2005, 15(8):513-515.
- [18] Campbell, George A. Physical theory of the electric wave-filter[J]. *Bell System Technical Journal*, 1922, 1(2):1-32.
- [19] Akers, Francis I, Balatoni N A, et al. Plug-in multiplexer[J]. WO1996029841 A1, 1996.
- [20] Srinivasan B, Jain R K. First demonstration of thermally poled electrooptically tunable fiber Bragg gratings[J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 2000, 12(2):170-172.
- [21] Honglin An, Min S S, Fleming S. Periodically erasing the second-order optical nonlinearity in thermally poled optical fibers with UV light[J]. *Photonics Asia 2010 International Society for Optics and Photonics*, 2010:199-283.
- [22] Mizunami, Toru, Miyazaki R, et al. Quasi-phase-matched second-harmonic generation in thermally poled twin-hole silica-glass optical fiber by mercury-lamp exposure[J]. *Thin Solid Films*, 2014, 5(59):14-17.
- [23] Huang L, Ren G, Sun X M. Evolution of two-dimensional electric field in poled twin-hole optical fiber[J]. *International Photonics and Optoelectronics Meetings*, 2014, 5.
- [24] Petrov M I, Lepenkin Y A, Lipovskii A A. Polarization of glass containing fast and slow ions[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(4):043101-043101-8.

~~~~~

(上接第59页)

- [5] 翟永平,周东翔,刘云辉,等. 聚焦函数性能评价指标设计及最优函数选取[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 1-11.
- [6] 冯精武,喻擎苍,芦宁,等. 调焦系统中数字图像清晰度评价函数的研究[J]. *机电工程*, 2011, 28(3): 354-368.
- [7] 李奇,冯华君,徐之海,等. 数字图像清晰度评价研究[J]. *光子学报*, 2002, 31(6):736-738.
- [8] 王鸿南,钟文,汪静. 图像清晰度评价方法研究[J]. *中国图像图形学报*, 2004, 9(7): 828-831.
- [9] 张起贵,张雪梅. 基于小波提升的自动聚焦评价函数[J]. *太原理工大学学报*, 2009, 40(3): 243-245.
- [10] 吴小翠,郭斯羽,易国. 基于边界梯度的自动调焦评价函数[J]. *计算机系统应用*, 2010, 19(3).