

# 纤芯填充液晶光子晶体光纤的电场调控特性研究

罗才秀<sup>1</sup> 谢应茂<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 赣南师范学院物理与电子信息学院, 江西 赣州 341000  
<sup>2</sup> 赣南师范学院光电子材料与技术研究所, 江西 赣州 341000)

**摘要** 基于液晶的电场调控特性,利用时域有限差分(FDTD)法和完美吸收边界条件(PML)数值计算了:三角格子周期性排列的圆空气孔构成的完美二维光子晶体的禁带结构;纤芯填充 5CB 液晶光子晶体光纤在外加电场方向与  $x$  轴夹角  $\theta$  分别为  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  时的波谱图;以波长 2504 nm 和  $\theta$  分别为  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  对应的局域模波长作为波源时的光场分布。结果表明:完美二维光子晶体存在范围为 2334~2438 nm 的禁带;纤芯填充 5CB 液晶光子晶体光纤的局域模波长随着夹角  $\theta$  的增大向短波方向移动,当夹角  $\theta$  在  $(0^\circ, 90^\circ)$  范围内变化时,局域模波长的最大调控量为 73 nm;对于波源为禁带范围外的光波,光场能量不局限在光纤纤芯;对于光源为局域模波长的光波,夹角  $\theta$  越大,光场能量越集中于纤芯区,且光场能量分布越均匀。

**关键词** 光纤光学;液晶光子晶体光纤;时域有限差分法;局域模;光场分布

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s105012

## Electrically Control Characteristics of Liquid Crystal Filled Photonic Crystal Fiber

Luo Caixiu<sup>1</sup> Xie Yingmao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> School of Physics and Electronic Information, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000, China  
<sup>2</sup> Institute of Optoelectronic Materials and Technology, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000, China

**Abstract** Based on the electrically control characteristics of liquid crystal, the band-gap of an perfect two-dimensional photonic crystal which is composed of triangular lattice circular air holes, the spectrum of liquid crystal 5CB filled photonic crystal fiber for different angles  $\theta$  which are between the direction of external electric field and  $x$ -axis, and the optical field distributions when the wave source wavelength is 2504 nm and different defect modes wavelength are numerically calculated by finite-difference time-domain (FDTD) and perfectly matched layer (PML). The results show as follow: the band-gap of an perfect two-dimensional photonic crystal ranges from 2335 nm to 2438 nm; the defect modes move to short-wave with the increasing of the angle  $\theta$ , and the maximum value of regulation is 73 nm when the angle  $\theta$  ranges from  $0^\circ$  to  $90^\circ$ ; the light energy will not localize at the fiber core when the wave source wavelength is not within the band-gap limits; the light energy will localize at the fiber core when the wave source wavelength corresponds to different defect modes wavelength, and its distribution is more homogeneous with the increment of the angle  $\theta$ .

**Key words** fiber optics; liquid crystal photonic crystal fiber; finite-difference time-domain method; defect mode; optical field distribution

**OCIS codes** 160.2290; 160.5298; 310.6860

## 1 引言

由于光子晶体光纤具有宽的工作波长范围、无截止单模特性及反常色散特性等许多优于常规光纤

的优良特性,已引起了国内外研究者的广泛关注<sup>[1-4]</sup>。光子晶体光纤是一种由单一介质和空气孔形成的新型光纤。根据其导光机制的不同,光子晶

收稿日期: 2013-09-29; 收到修改稿日期: 2013-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(61067002)、江西省自然科学基金(20132BAB202004)

作者简介: 罗才秀(1988—),女,硕士研究生,主要从事导波光学方面的研究。E-mail: luocaixiu@126.com

导师简介: 谢应茂(1963—),男,博士,教授,主要从事激光物理与光电子学方面的研究。E-mail: xieyingmao@126.com

体光纤可分为全内反射型和光子带隙型。通过在空气孔中填充聚合物、高折射率液体或液晶等材料,利用它们对外界环境的敏感性质来实现光子晶体光纤性质的可调控的研究已成为光子晶体光纤研究的一个热点问题<sup>[5-8]</sup>。液晶分子对外界环境非常敏感,对液晶填充光子晶体光纤的研究主要通过外加电场、温度进行调控<sup>[9-11]</sup>。

此处提出了一种纤芯填充液晶的带隙型光子晶体光纤,该光纤包层为硅介质中含有三角周期排列的空气孔,利用时域有限差分(FDTD)法和完美吸收边界条件(PML)数值计算分析了光子晶体光纤的局域模及其光场分布随外加电场方向的变化关系。

## 2 物理模型

完美二维光子晶体的结构模型如图 1(a)所示,背景材料为硅介质,其相对介电常数为 11.9,包层是孔距  $\Lambda$  为  $2.925 \mu\text{m}$ ,孔径  $d$  为  $0.9\Lambda$  的按三角形格子周期性排列的圆空气孔。纤芯填充液晶光子晶体光纤的结构模型如图 1(b)所示,与完美二维光子晶体光子晶体不同的是,其纤芯填充向列相液晶 5CB,纤芯直径为  $7.5 \mu\text{m}$ 。图中点  $o$  为波源发射点,  $a$  为光波观测点。设电场方向平行于  $xoz$  平面,  $\theta$  是外加电场方向与  $x$  轴的夹角。

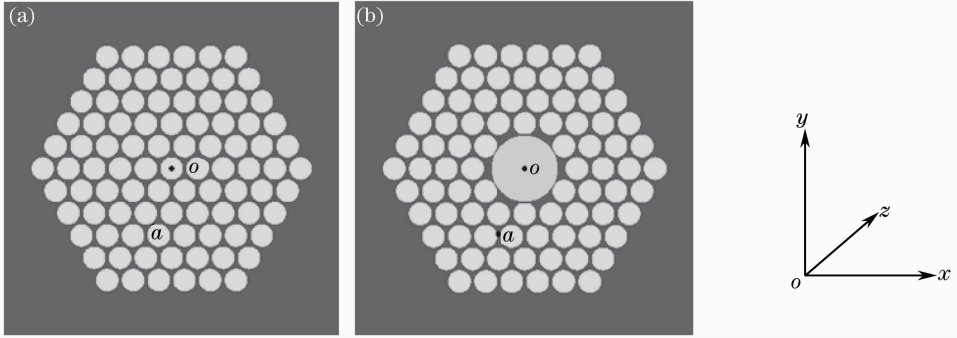


图 1 结构模型。(a)完美二维光子晶体; (b)纤芯填充液晶的光子晶体光纤

Fig. 1 Structure model. (a) Perfect two-dimensional photonic crystal; (b) liquid crystal photonic crystal fiber

当外加电场足够强时,液晶分子长轴方向与外加电场方向一致,液晶可看做单轴介质,其介电张量可以表示为

$$\boldsymbol{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

在空间直角坐标系  $xoz$  平面内,液晶分子长轴与  $x$  轴方向的夹角为  $\theta$  时,张量矩阵  $\boldsymbol{\epsilon}'$  可利用旋转矩阵计算,即

$$\boldsymbol{\epsilon}' = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \cos^2 \theta + \epsilon_{zz} \sin^2 \theta & 0 & (\epsilon_{xx} - \epsilon_{zz}) \cos \theta \sin \theta \\ 0 & \epsilon_{yy} & 0 \\ (\epsilon_{xx} - \epsilon_{zz}) \cos \theta \sin \theta & 0 & \epsilon_{xx} \sin^2 \theta + \epsilon_{zz} \cos^2 \theta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

对于二维问题,设所有的物理量与  $z$  轴无关,即  $\partial/\partial_z=0$ ,则在平行极化波(TM波)FDTD公式中液晶的介电张量可表示为

$$\epsilon = \epsilon_0 [\epsilon_{xx} \sin^2 \theta + \epsilon_{zz} \cos^2 \theta], \quad (3)$$

对于向列相液晶 5CB,其  $\epsilon_{xx}=2.32, \epsilon_{yy}=2.91$ 。

## 3 数值计算与结果

首先利用 FDTD 和 PML<sup>[12]</sup>,用 Matlab 软件进行数值计算。计算参数设置如下:空间步长  $\Delta x = \Delta y = 36.563 \text{ nm}$ ,时间步长  $\Delta t = 6.0980 \times 10^{-18} \text{ s}$ ;在  $o$  点的激励源设为高斯脉冲,其电场强度  $E'_z =$

$\exp\left[-\frac{4\pi(t-3\tau)^2}{\tau^2}\right]$ , 其中时间常数  $\tau = 7.6 \times 10^{-17}$  s,  $T = \frac{E^2}{E_z^2}$ ,  $E$  和  $E_z$  分别为经过快速傅里叶变换(FFT)后在  $a$  点和  $o$  点的电场强度。经过 30000 个时间步长, 得到了完美二维光子晶体在观测点  $a$  处的波谱, 如图 2 所示。由图 2 可得, 完美二维光子晶体存在范围为 2334~2438 nm 的禁带。

计算参数不变, 经过 30000 个时间步长, 得到了  $\theta$  分别为  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  时在观测点  $a$  处的波谱, 如图 3 所示。由图 3 可知, 夹角  $\theta$  为  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  分别对应的局域模波长为 2427, 2416, 2358, 2354 nm。由此可得, 局域模波长将随着外加电场方向与  $x$  轴的夹角  $\theta$  的增大向短波方向移动,

当夹角  $\theta$  在  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内变化时, 局域模波长的最大调控量为 73 nm。

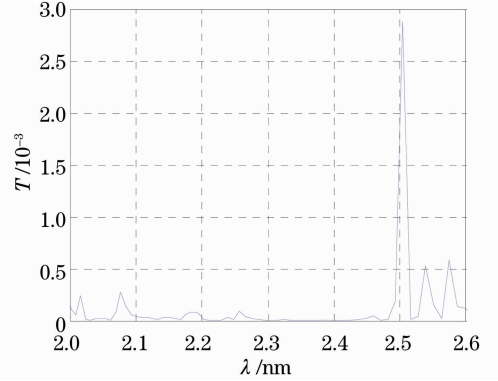


图 2 完美二维光子晶体的波谱

Fig. 2 Spectrum of perfect two-dimensional photonic crystal

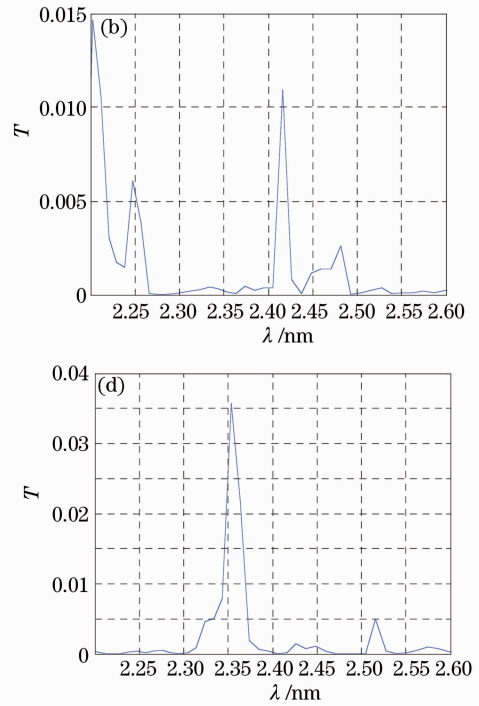
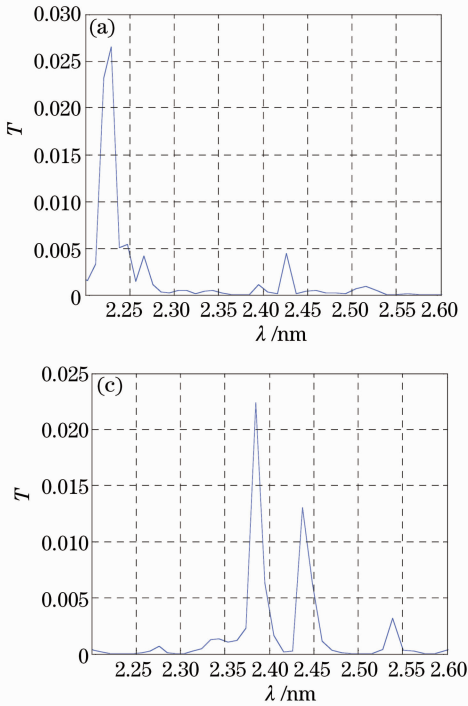


图 3 不同角度时在观测点  $a$  处的波谱。(a)  $\theta=0^\circ$ ; (b)  $\theta=30^\circ$ ; (c)  $\theta=60^\circ$ ; (d)  $\theta=90^\circ$

Fig. 3 Spectra for different angles at observation spot  $a$ . (a)  $\theta=0^\circ$ ; (b)  $\theta=30^\circ$ ; (c)  $\theta=60^\circ$ ; (d)  $\theta=90^\circ$

为了研究液晶填充的光子晶体光纤的局域特性, 激励源设为正弦波源  $E_z = \sin \omega t$ , 其中  $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$ ,  $c$  为光速,  $\lambda$  为光波波长。取禁带范围外 2504 nm 的光波作为波源波长, 经过 30000 个时间步长, 得到了  $\theta$  为  $30^\circ$  和  $60^\circ$  时的光场分布如图 4 所示。由图 4 可知, 对于波源为禁带范围外的光波, 光场能量不局域在光纤纤芯。

最后, 分别取不同夹角  $\theta$  对应的局域模波长作为波源波长, 经过 30000 个时间步长, 得到了  $\theta$  分别为  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  时的光场分布, 如图 5 所示。由图 5 可得, 对于不同夹角  $\theta$  对应的局域模波长作为波源波长, 光场能量主要局域在光纤纤芯区, 并且夹角  $\theta$  越大, 光场能量分布越均匀。

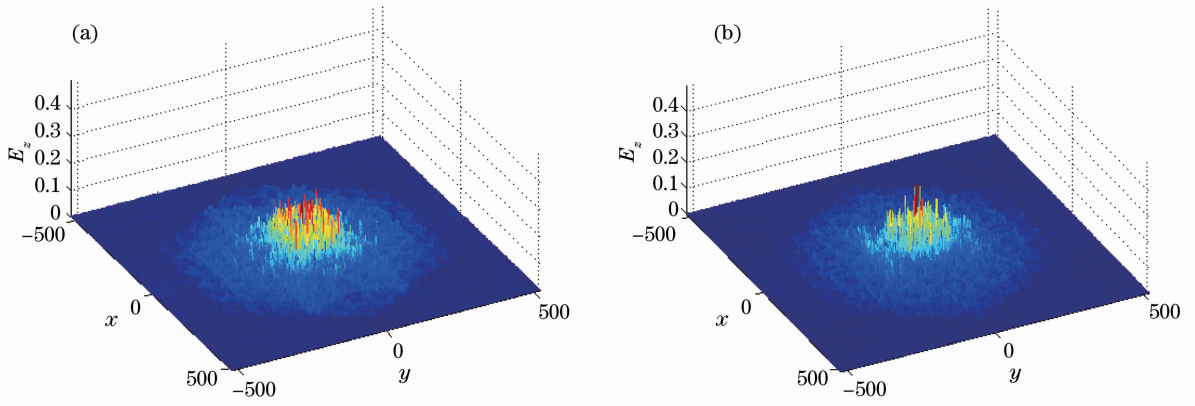


图 4 波源波长为 2504 nm 在不同角度时的光场分布。(a)  $\theta=30^\circ$ ; (b)  $\theta=60^\circ$

Fig. 4 Optical distributions of wave source which wavelength is 2504 nm at different angles. (a)  $\theta=30^\circ$ ; (b)  $\theta=60^\circ$

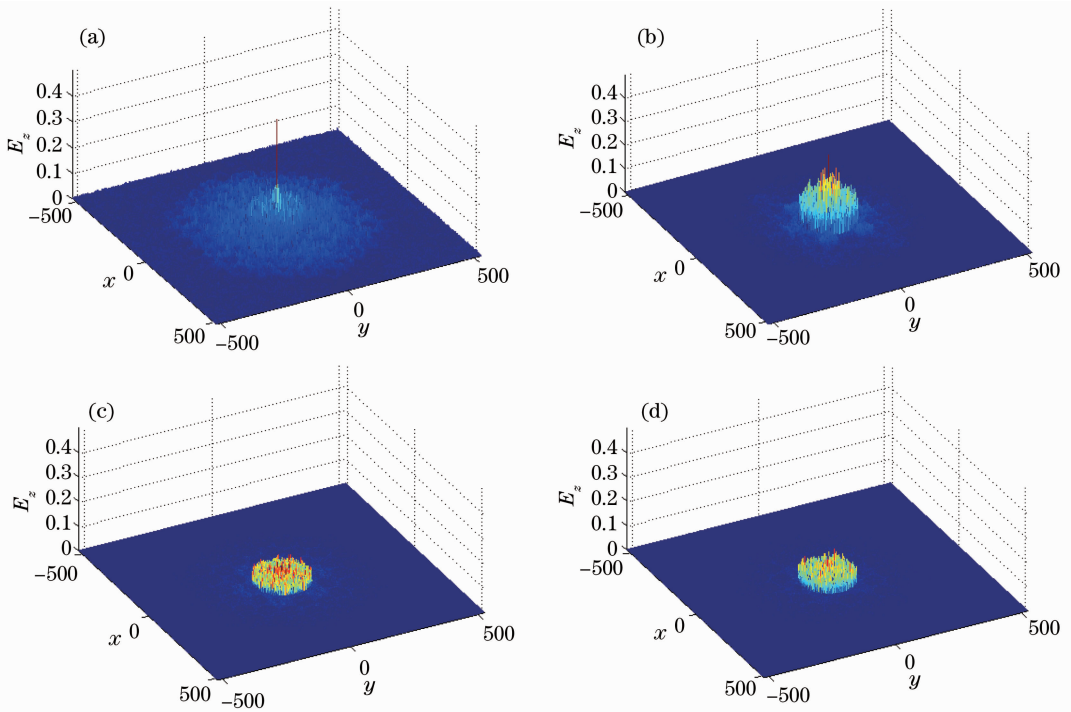


图 5 不同局域模波长作为波源时的光场分布。(a)  $\theta=0^\circ$ ; (b)  $\theta=30^\circ$ ; (c)  $\theta=60^\circ$ ; (d)  $\theta=90^\circ$

Fig. 5 Optical distributions of wave source which wavelengths correspond to different defect modes wavelengths.

(a)  $\theta=0^\circ$ ; (b)  $\theta=30^\circ$ ; (c)  $\theta=60^\circ$ ; (d)  $\theta=90^\circ$

## 4 结 论

基于液晶的电场调控特性,利用 FDTD 和 PML 数值计算了三角圆空气孔周期性排列的完美二维光子晶体的禁带结构和纤芯填充液晶的光子晶体光纤在夹角  $\theta$  分别为  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  的局域模波长。结果表明:纤芯填充液晶的光子晶体光纤的局域模波长将随着电场方向与  $x$  轴的夹角  $\theta$  的增大向短波方向移动,当角度  $\theta$  在  $(0^\circ, 90^\circ)$  范围内变化时,局域模波长的最大调控量为 73 nm;对于波源为禁带范围外的光波,光场能量不局限在光纤纤芯;对

于光源为局域模波长的光波,光场能量主要局限在光纤纤芯区,并且夹角  $\theta$  越大,光场能量分布越均匀。这为可调光子晶体光纤的制作和应用具有一定的理论指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 Yun Maojin, Liang Jian, Ren Liyong, *et al.*. Design and optimization of slow light photonic bandgap fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0406005.  
云茂金, 梁 健, 任立勇, 等. 带隙型光子晶体光纤慢光特性的优化设计[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0406005.
- 2 Wu Yulong, Sun Xiaohong, Liu Wei. Investigation on defect-

- mode property of ten-fold photonic quasicrystal [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6): 062601.
- 武毓龙, 孙晓红, 刘薇. 十重准晶光子晶体缺陷模性质研究[J]. *激光与光电子进展*, 2013, 50(6): 062601.
- 3 Y Y Wang, X Peng, M Alharbi, *et al.*. Design and fabrication of hollow-core photonic crystal fibers for high-power ultrashort pulse transportation and pulse compression[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(15): 3111–3113.
- 4 Chai Lu, Hu Minglie, Fang Xiaohui, *et al.*. Advances in femtosecond laser technologies with photonic crystal fibers[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0101001.
- 柴路, 胡明列, 方晓惠, 等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0101001.
- 5 T T Alkeskjold, J L gsgaard, A Bjarklev. All-optical modulation in dye-doped nematic liquid crystal photonic bandgap fibers[J]. *Opt Express*, 2004, 12(24): 5857–5871.
- 6 Wu Tiesheng, Wang Li, Wang Zhe, *et al.*. A photonic crystal fiber temperature sensor based on Sagnac interferometer structure [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(11): 1114002.
- 伍铁生, 王丽, 王哲, 等. 一种 Sagnac 干涉仪结构的光子晶体光纤温度传感器[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1114002.
- 7 Zhang Min, Liu Min, Sun Shihong, *et al.*. Analysis of temperature sensing characteristics of photonic bandgap photonic crystal fiber[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(2): 204–207.
- 张敏, 刘敏, 孙世红, 等. 光子带隙型光子晶体光纤温度传感特性分析[J]. *激光技术*, 2012, 36(2): 204–207.
- 8 Yao Jianquan, Wang Ran, Miao Yinping, *et al.*. Novel photonic functional devices based on liquid-filling microstructured optical fibers[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0101002.
- 姚建铨, 王然, 苗银萍, 等. 基于液体填充微结构光纤的新型光子功能器件[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0101002.
- 9 Qian Xiangzhong. Filter properties of band gap photonic crystal fibers based on liquid crystal filling [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2009, 30(5): 687–690.
- 钱祥忠. 基于液晶填充的带隙型光子晶体光纤的滤波特性[J]. *半导体光电*, 2009, 30(5): 687–690.
- 10 Du Jiangbing, Liu Yange, Wang Zhi, *et al.*. Electrically tunable Sagnac filter based on a photonic bandgap fiber with liquid crystal infused[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(19): 2215–2217.
- 11 Qian Xiangzhong. Effect of temperature on transmission properties in photonic crystal fibers infiltrated with liquid crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5): 988–991.
- 钱祥忠. 温度对液晶填充光子晶体光纤传输特性的影响[J]. *光学学报*, 2008, 28(5): 988–991.
- 12 Ge Debiao, Yan Yubo. Finite-Difference Time Domain Method for Electromagnetic Wave[M]. Xi'an: Xi'an Electronic Science & Technology University Press, 2005. 11–147.
- 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005. 11–147.

栏目编辑：王晓琰