

文章编号: 0253-2239(2008)07-1384-06

基于图像处理的频域有限差分法用于实际光子晶体光纤的研究

姚宇宏¹ 栗岩锋¹ 刘博文¹ 胡明列¹ 柴路¹ 王清月¹ 童维军² 罗杰²

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

² 长飞光纤光缆有限公司研发中心, 湖北 武汉 430073

摘要 提出了一种基于图像处理算法和频域有限差分法相结合研究实际光子晶体光纤的数值分析方法。该方法针对实际光子晶体光纤由于结构不规则难以进行数值分析的缺点, 采取首先对光子晶体光纤的电镜扫描图像使用阈值分割和维纳滤波等图像处理算法获得光纤截面的几何图像, 然后使用图像插值及构造均值移动窗口滤波等方法实现了网格划分和介电系数平均等步骤, 最后结合频域有限差分法对光纤特性进行分析计算。结果表明, 该方法能够精确分析实际光子晶体光纤的色散特性, 模拟得到的实际光子晶体光纤的模场分布与实验结果吻合很好。

关键词 导波光学; 光子晶体光纤; 频域有限差分法; 数值分析; 数字图像处理

中图分类号 TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082807.1384

Analysis of Real Photonic Crystal Fibers by Finite-Difference Frequency-Domain Method Combined with Digital Image Processing

Yao Yuhong¹ Li Yanfeng¹ Liu Bowen¹ Hu Minglie¹ Chai Lu¹ Wang Qingyue¹
Tong Weijun² Luo Jie²

¹ Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Optoelectronics Information and Technical Science, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China

² Yangtze Optical Fiber and Cable Company Ltd., Wuhan, Hubei 430073, China

Abstract A finite-difference frequency-domain method combined with digital image processing is used to analyze real photonic crystal fibers. To overcome the difficulties imposed by the irregularity of the fiber cross section, the fiber structure is first obtained from the scanning electron microscopy (SEM) image of a real photonic crystal fiber by such digital image processing techniques as thresholding segmentation and Wiener filtering. Image interpolation and window filtering method are then employed to realize mesh division and permittivity averaging. Parameters obtained above are used in fiber property analysis by the finite-difference frequency-domain method. It is shown that the proposed method gets accurate fiber dispersion compared with measurement, and also that the calculated mode field distributions correspond well with those recorded in the experiment.

Key words guided wave optics; photonic crystal fiber; finite-difference frequency-domain method; numerical analysis; digital image processing

收稿日期: 2007-07-17; 收到修改稿日期: 2007-09-21

基金项目: 国家 973 计划(2003CB314904, 2006CB806002)、国家 863 计划(2007AA03Z447)和国家自然科学基金(60678012)资助课题。

作者简介: 姚宇宏(1985—), 男, 主要从事光子晶体光纤理论方面的研究。E-mail: yaoyuhong@mail.nankai.edu.cn

导师简介: 栗岩锋(1977—), 男, 副教授, 博士, 主要从事飞秒激光与微结构材料等方面的研究。

E-mail: yanfengli@tju.edu.cn

1 引言

光子晶体光纤^[1](PCF)是近年来出现的一种新型光纤,这种光纤通常由单一介质构成并由在二维方向上紧密排列而轴向保持结构不变的波长量级的空气孔构成微结构包层。由于其具有很多传统光纤无法实现的特性^[2~6]而受到广泛关注并成为近年来光学与光电子学研究领域的热点。用于光子晶体光纤数值分析的常用方法^[7]有平面波法,有限元法和差分法(包括时域有限差分法和频域有限差分法^[8,9])等。

目前,对光子晶体光纤的数值计算一般还只停留在对理想化的光子晶体光纤模型进行分析,也就是说,光纤的截面特征必须能够解析地表示。但是由于实际拉制的光子晶体光纤结构往往并不规则,如果将其等效为理想化的模型分析将会带来很大的误差,尤其是计算色散等对于光纤结构非常敏感的一些参量。对于实际光子晶体光纤与理想结构的差异,文献[10,11]提到了利用实际光纤的扫描电镜(SEM)图像获得光纤结构,但对如何处理扫描电镜图像却没有论述。要获得准确的光纤结构涉及到如去噪,阈值分割等许多问题,并且如何将数值计算方法转化为图像处理算法从而对光纤图像进行实际操作也是值得研究的问题。

本文提出了一种基于图像处理与频域有限差分法相结合的光子晶体光纤数值分析方法。该方法通

过直接读入光子晶体光纤截面的扫描电镜图像,采用数字图像处理的方法对图像矩阵直接进行操作。能够准确地分析形状不规则的实际光子晶体光纤,是一种高效准确的手段。

2 频域有限差分法

频域有限差分法(FDFD)是近年来提出的基于Yee网格的一种差分法^[8,9],它从麦克斯韦方程组出发进行离散化,得到电场或磁场所满足的稳态时的本征值方程。与时域有限差分法相比,频域有限差分法不需要花大量时间进行迭代运算,因此具有很高的运算速度。频域有限差分法可以用来分析缺陷模式、包层基模、光子带隙和束缚损耗等许多光子晶体光纤的特性参量,应用范围相当广泛。现将方法概述如下^[8]:

在光子晶体光纤中,假定沿轴向传播的电磁场具有以下传播形式:

$$\psi(x, y, z) = \psi(x, y) \cdot \exp[j(\omega t - \beta z)], \quad (1)$$

介质中的麦克斯韦方程可表示为

$$\nabla \times \mathbf{H} = jk_0 \epsilon_r \mathbf{E}, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -jk_0 \mathbf{H}, \quad (2)$$

式中 ϵ_r 为介质的介电系数, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空中的波数。根据 $\omega = k_0 c = k_0 / \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ 的关系,采用图1所示的二维Yee网格离散各个场分量,可以得到

$$ik_0 H_x(j, l) = \frac{E_z(j, l+1) - E_z(j, l)}{\Delta y} - i\beta E_y(j, l), \quad (3a)$$

$$ik_0 H_y(j, l) = i\beta E_x(j, l) - \frac{E_z(j+1, l) - E_z(j, l)}{\Delta x}, \quad (3b)$$

$$ik_0 H_z(j, l) = \frac{E_y(j, l+1) - E_y(j, l)}{\Delta x} - \frac{E_x(j, l+1) - E_x(j, l)}{\Delta y}, \quad (3c)$$

$$-ik_0 \epsilon_{rx}(j, l) E_x(j, l) = \frac{H_z(j, l) - H_z(j, l-1)}{\Delta y} - i\beta H_y(j, l), \quad (4a)$$

$$-ik_0 \epsilon_{ry}(j, l) E_y(j, l) = i\beta H_x(j, l) - \frac{H_z(j, l) - H_z(j-1, l)}{\Delta x}, \quad (4b)$$

$$-ik_0 \epsilon_{rz}(j, l) E_z(j, l) = \frac{H_y(j, l) - H_y(j-1, l)}{\Delta x} - \frac{H_x(j, l) - H_x(j, l-1)}{\Delta y}, \quad (4c)$$

考虑到场的不连续性,介电系数取如下的平均值:

$$\epsilon_{rx}(j, l) = \frac{\epsilon_r(j, l) + \epsilon_r(j, l-1)}{2}, \quad (5a)$$

$$\epsilon_{ry}(j, l) = \frac{\epsilon_r(j, l) + \epsilon_r(j-1, l)}{2}, \quad (5b)$$

$$\epsilon_{rz}(j, l) = \frac{\epsilon_r(j, l) + \epsilon_r(j-1, l-1) + \epsilon_r(j, l-1) + \epsilon_r(j-1, l)}{4}, \quad (5c)$$

将方程写成矩阵形式并消元后,得到电场横向分量的本征值方程:

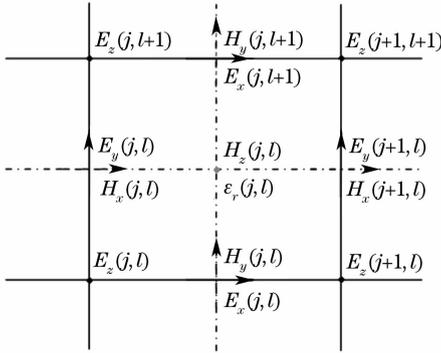


图 1 Yee 二维网格示意图

Fig. 1 Two-dimensional Yee mesh

$$\mathbf{P} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{xx} & P_{xy} \\ P_{yx} & P_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \beta^2 \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} P_{xx} &= -k_0^{-2} \mathbf{U}_x \boldsymbol{\epsilon}_{rz}^{-1} \mathbf{V}_y \mathbf{V}_x \mathbf{U}_y + \\ &\quad (k_0^2 \mathbf{I} + \mathbf{U}_x \boldsymbol{\epsilon}_{rz}^{-1} \mathbf{V}_x) (\boldsymbol{\epsilon}_{rx} + k_0^{-2} \mathbf{V}_y \mathbf{U}_y), \\ P_{yy} &= -k_0^{-2} \mathbf{U}_y \boldsymbol{\epsilon}_{rz}^{-1} \mathbf{V}_x \mathbf{V}_y \mathbf{U}_x + (k_0^2 \mathbf{I} + \\ &\quad \mathbf{U}_y \boldsymbol{\epsilon}_{rz}^{-1} \mathbf{V}_y) (\boldsymbol{\epsilon}_{ry} + k_0^{-2} \mathbf{V}_x \mathbf{U}_x), \\ P_{xy} &= \mathbf{U}_x \boldsymbol{\epsilon}_{rz}^{-1} \mathbf{V}_y (\boldsymbol{\epsilon}_{ry} + k_0^{-2} \mathbf{V}_x \mathbf{U}_x) - \\ &\quad k_0^{-2} (k_0^2 \mathbf{I} + \mathbf{U}_x \boldsymbol{\epsilon}_{rz}^{-1} \mathbf{V}_x) \mathbf{V}_y \mathbf{U}_x, \\ P_{yx} &= \mathbf{U}_y \boldsymbol{\epsilon}_{rz}^{-1} \mathbf{V}_x (\boldsymbol{\epsilon}_{rx} + k_0^{-2} \mathbf{V}_y \mathbf{U}_y) - \\ &\quad k_0^{-2} (k_0^2 \mathbf{I} + \mathbf{U}_y \boldsymbol{\epsilon}_{rz}^{-1} \mathbf{V}_y) \mathbf{V}_x \mathbf{U}_y, \end{aligned} \quad (7)$$

其中 \mathbf{I} 为单位矩阵, $\boldsymbol{\epsilon}_{rx}$, $\boldsymbol{\epsilon}_{ry}$ 和 $\boldsymbol{\epsilon}_{rz}$ 由(5)式决定。 \mathbf{U}_x , \mathbf{U}_y , \mathbf{V}_x 和 \mathbf{V}_y 由边界条件决定。求解(6)式可以得到相应波长处的光子晶体光纤的传播常数 β 和场分量, 由式 $n_{\text{eff}} = \beta/k$ 可以得到相应的模式有效折射率。

3 图像处理算法

实际拉制的光子晶体光纤或多或少会偏离理想结构。图 2 为使用扫描电子显微镜(扫描电镜)得到的两种实际光子晶体光纤的截面图。可以看出, 图 2(a)的光纤(俄罗斯莫斯科国立大学提供)截面较为规则, 可以近似认为空气孔全部是直径一定的圆形孔, 且孔间距一定, 从而可以用理想化的模型近似处理, 但这样做必然会使计算结果出现一定误差, 而图 2(b)的光纤(长飞光纤光缆有限公司拉制)截面已经难以近似处理为理想化的模型, 因此有必要采用图像处理技术来研究实际的光纤结构。

$\boldsymbol{\epsilon}_{rx}$, $\boldsymbol{\epsilon}_{ry}$ 和 $\boldsymbol{\epsilon}_{rz}$ 三个介质介电系数矩阵需要根据光纤的几何结构确定。在光纤截面可以解析表示的理想化模型中, 很容易判断出网格节点是在介质中还是空气孔中, 而对于实际的光子晶体光纤, 光纤的几何结构需要通过读入扫描电镜图像确定, 方法是选取适当的阈值对读入的光纤截面图像进行二值化操作, 使得空气孔和介质的位置分别以二值化矩阵中的 0/1 表示, 由于图像中存在高频噪声, 二值化后需要对图像进行滤波去噪。在处理实际的光子晶体光纤时, Yee 网格的划分与介电系数矩阵的生成可以通过在图像矩阵中选取一定间隔的行(列)上的像素值确定。(5)式表示的介电系数平均的步骤可以通过构造均值移动窗口对图像矩阵元素重新计算得到, 图像中像素的横向以及纵向代表的实际距离可以通过扫描电镜图像的比例尺以及图像插值的倍数得到。下面详细介绍每一步的处理算法。

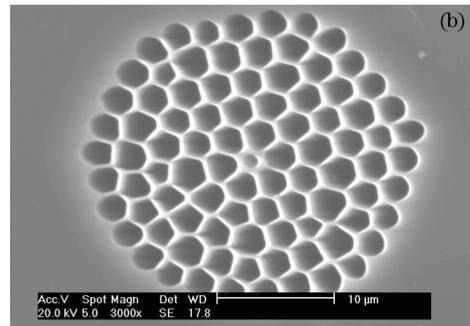
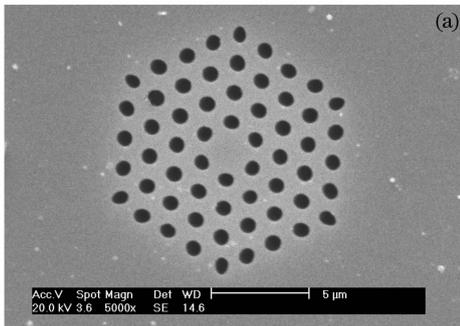


图 2 实际光子晶体光纤的扫描电镜截面图

Fig. 2 SEM images of real photonic crystal fibers

3.1 图像分割自适应阈值的确定

为了分离出空气孔与介质, 需要选取适当的阈值对图像进行二值化操作。在图像阈值分割的方法中, 准则函数法是一种常用的分割方法, 其基本思路是通过构造一个准则函数, 计算各灰度级下准则

函数值, 分割阈值将选择在使该准则函数最大或最小值处, 其中著名的准则函数法有最大类间方法(Otsu 法)^[12]、最大熵法^[13]以及最小误差准则分割法^[14]等。本文采用最大类间方法(Otsu 法)得到图像分割的自适应阈值。使用最大类间方法确定图像

分割自适应阈值的原理如下:

灰度图像设为 $F_{P \times Q} = \{f(x, y)\}_{P \times Q}$, 其中 $P \times Q$ 是图像的大小, $f(x, y)$ 是在像素点 (x, y) 处的灰度值。若图像的灰度级为 L , 则 $f(x, y) \in \{0, 1, \dots, L-1\}$ 。在图像中灰度级出现的次数为 n_i , 可归一化为 $p_i = \frac{n_i}{P \times Q}$ 。

假设以灰度值 t 为阈值把全部像素分成两类: S_1 (背景类) 包含了 $i \leq t$ 的像素; S_2 (前景类) 包含了 $i > t$ 的像素。 S_1 出现的几率为 $P_1 = \sum_{i=0}^t p_i$, S_2 出现的几率为 $P_2 = 1 - P_1$ 。

S_1 和 S_2 的类内中心值为

$$\mu_1 = \sum_{i=0}^t i p_i / P_1, \quad \mu_2 = \sum_{i=t+1}^{L-1} i p_i / P_2, \quad (8)$$

且有

$$P_1 \mu_1 + P_2 \mu_2 = \mu_0 = \sum_{i=0}^{L-1} i p_i, \quad (9)$$

由此给出前景类和背景类的类间方差为

$$\sigma^2 = P_1 (\mu_1 - \mu_0)^2 + P_2 (\mu_2 - \mu_0)^2 = P_1 P_2 (\mu_2 - \mu_1)^2. \quad (10)$$

最大类间方法对最优阈值的定义是阈值 t^* 应该是使 σ^2 最大的灰度值, 于是有自适应阈值的判据为

$$\sigma^2(t^*) = \max[\sigma^2(t)]. \quad (11)$$

设读入的电镜扫描图像为 $f(x, y)$, 最佳阈值

为 t^* , 分割后的二值图像为

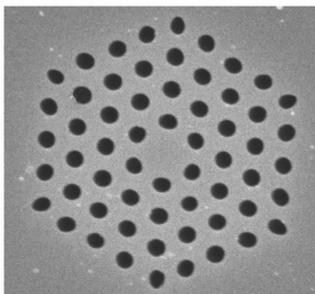
$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & f(x, y) \geq t^* \\ 0, & f(x, y) < t^* \end{cases} \quad (12)$$

3.2 维纳滤波去噪

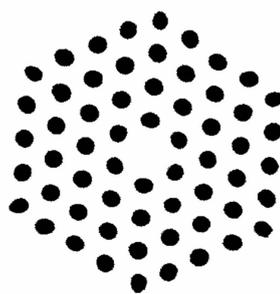
在对图像进行二值化操作后, 图像一般会有高频的点噪声出现, 这主要由于扫描电镜是依靠电子枪发射的电子束经电磁透镜聚焦打在样品表面所产生的二次电子来形成样品表面结构图像的, 而真空系统中仍然会有一些带电离子和尘埃, 以及图像生成系统本身有噪音信号。通常认为噪声信号是随机的, 多个像素的随机噪声在一定程度上相互抵消。根据空间邻接相似的原则, 采用维纳滤波法对噪声进行处理, 维纳滤波法的原理是根据图像的局部变异进行自适应的平滑滤波。变异大的地方, 滤波器进行较小的平滑, 变异小的地方, 滤波器进行较大的平滑。由于可以保留图像的边界和其他高频部分, 这种方法常常比普通的线性滤波效果更好。

图 3 给出了使用自适应阈值对图像进行二值化并滤波后得到的图像, 可以看出, 二值化后图像上分布有很多点噪声, 结合去噪算法, 可以将空气孔与介质很好地分离出来。

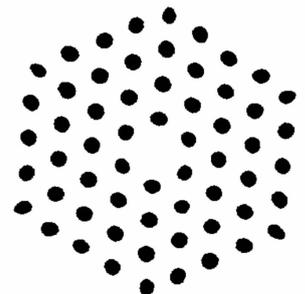
为构造介电系数矩阵, 在去噪后的二值化图像矩阵中, 将代表空气孔和介质的 0/1 像素分别用空气孔和介质的实际介电系数替换。



(a) original image



(b) after binarization



(c) after image denoising

图 3 空气孔与介质的图像分割。(a)原图像,(b)二值化后,(c)去噪后

Fig. 3 Image segmentation of air holes and medium. (a) Original image, (b) after binarization, (c) after image denoising

3.3 介电系数平均

频域有限差分模型在处理介质与空气孔的边界时运用了介电系数平均的方法定义介质交界处的介电系数(5)式。在图像矩阵中, 该步骤可以通过构造移动窗口对图像进行处理来实现, 即构造均值移动窗口重新计算图像矩阵的元素。

例如, 对于(5a)式 x 方向的介电系数平均:

$\epsilon_{rx}(j, l) = [\epsilon_r(j, l) + \epsilon_r(j, l-1)]/2$ 。构造 1×2 大小的均值移动窗口, 窗口右边的元素为待处理元素, 处理后该像素的值为窗口中两个像素值的算术平均。

$$\begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}$$

滤波公式为

$$p'(j, l) = p(j, l)/2 + p(j, l-1)/2, \quad (13a)$$

再如,(5c)式 z 方向的介电系数平均 $\epsilon_{rz}(j, l) = \frac{\epsilon_r(j, l-1) + \epsilon_r(j, l) + \epsilon_r(j-1, l) + \epsilon_r(j-1, l-1)}{4}$,

构造的移动窗口为

$$\begin{array}{|c|c|} \hline 1/4 & 1/4 \\ \hline 1/4 & 1/4 \\ \hline \end{array}$$

滤波公式为

$$p'(j, l) = \frac{p(j-1, l)}{4} + \frac{p(j, l)}{4} + \frac{p(j-1, l-1)}{4} + \frac{p(j, l-1)}{4}. \quad (13b)$$

3.4 介电系数矩阵的生成

频域有限差分模型中的网格划分,在图像处理中对应的方法是取一定间隔的行列元素。即用一定数量的网格划分计算区域(即图像矩阵),根据 Yee 网格中场分量的位置,在图像矩阵中取出相应的行/列的像素值。为了使一定大小的 Yee 网格能够等分图像,图像矩阵的行列数必须是划分的网格数以及每个网格对应的行(列)宽度的倍数。通过对图像插值将其扩大(缩小)为大小一定的图像矩阵来实现上述操作。在最终生成的图像矩阵中,根据网格划分的位置,取出相应网格节点上的像素值生成介电系数矩阵。由于插值后图像中每一像素代表的实际光纤中的距离发生了变化,还需要重新计算横向(纵向)每一像素代表的实际距离。

4 模拟结果与实验验证

为了验证上述方法的可行性和准确性,首先对图 2(a)所示的实际光子晶体光纤的色散特性进行了分析。

通过选取自适应阈值对图像二值化,使用维纳滤波去噪后就得到了图 3(c)的二值化图像,以纤芯为中心,选取一定大小的矩形区域作为计算窗口和零边界条件构造出了 U_x, U_y, V_x 和 V_y 四个场分量关系矩阵,按照第三节的方法构造介电系数矩阵 $\epsilon_{rx}, \epsilon_{ry}$ 和 ϵ_{rz} 后代入(6)式,(7)式可以计算出一定波长范围内光纤的基模有效折射率 n_{eff} 。光纤的色散曲线可以由式

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2}, \quad (14)$$

其中材料色散由 Sellmeier 公式加以考虑。

图 4 给出了计算值与测量结果的对比。其中,

计算结果在图中用实线表示,使用白光干涉法^[15]实际测得的色散曲线用虚线表示,点划线代表将光纤近似为一理想化模型(孔直径取 $0.66 \mu\text{m}$,孔间距取 $1.4 \mu\text{m}$)计算的结果。计算得到的光纤的零色散点为 855 nm 与实验测得的 857 nm 吻合的很好,而且两条曲线的斜率也很接近,而理论模型的零色散值向长波长方向偏移近 20 nm ,有很大的误差。我们认为这一误差是由于光纤存在的不规则性与理想化模型的尺寸偏离所导致的。由此可见该方法由于是对真实光纤的扫描电镜图像进行直接处理,而不是对光纤的结构进行理想化估计,因此我们的计算结果更加符合实验测得的数据。

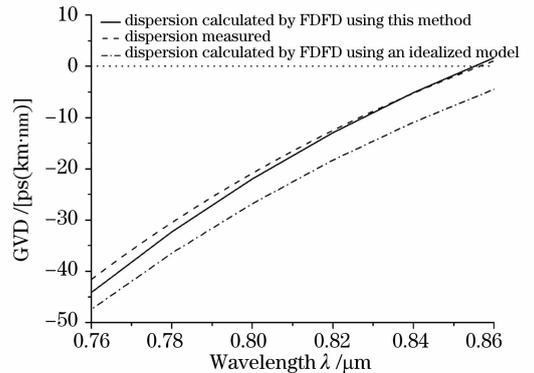


图 4 计算结果与实验测得的色散曲线对比

Fig. 4 Comparison of calculated and experimentally measured dispersion curves

为了进一步研究方法的可行性和准确性,接下来分析图 2(b)所示的光子晶体光纤。由于光纤结构不规则,这种光纤已经无法简单近似为理论结构处理。对这种光纤的处理体现了本方法在实际应用中的价值。

基于该光纤高阶模式下的非线性传输过程, 800 nm 附近入射的飞秒激光通过相位匹配过程在光纤中会被频率变换到其他波长,而在此过程中会有高阶模式的参与,结果在光纤的出射端会观察到色彩各异的模场图^[16,17],如图 5(a)所示。根据第 3 节的处理方法,在得到 U_x, U_y, V_x 和 V_y 以及 $\epsilon_{rx}, \epsilon_{ry}$ 和 ϵ_{rz} 七个矩阵并代入(6)式,(7)式后,选取一定的入射光波长,计算得到了图 2(b)所示光纤的 3 个模式的场分布图,如图 5(b)所示。这些模式分别对应于光子晶体光纤的基模、二阶模和更高阶模式。与实际拍摄的图像进行对比,发现几种模式的场图非常吻合,这就证明了本方法的准确性。具体分析相位匹配过程和非线性效应参考文献^[16,17]。

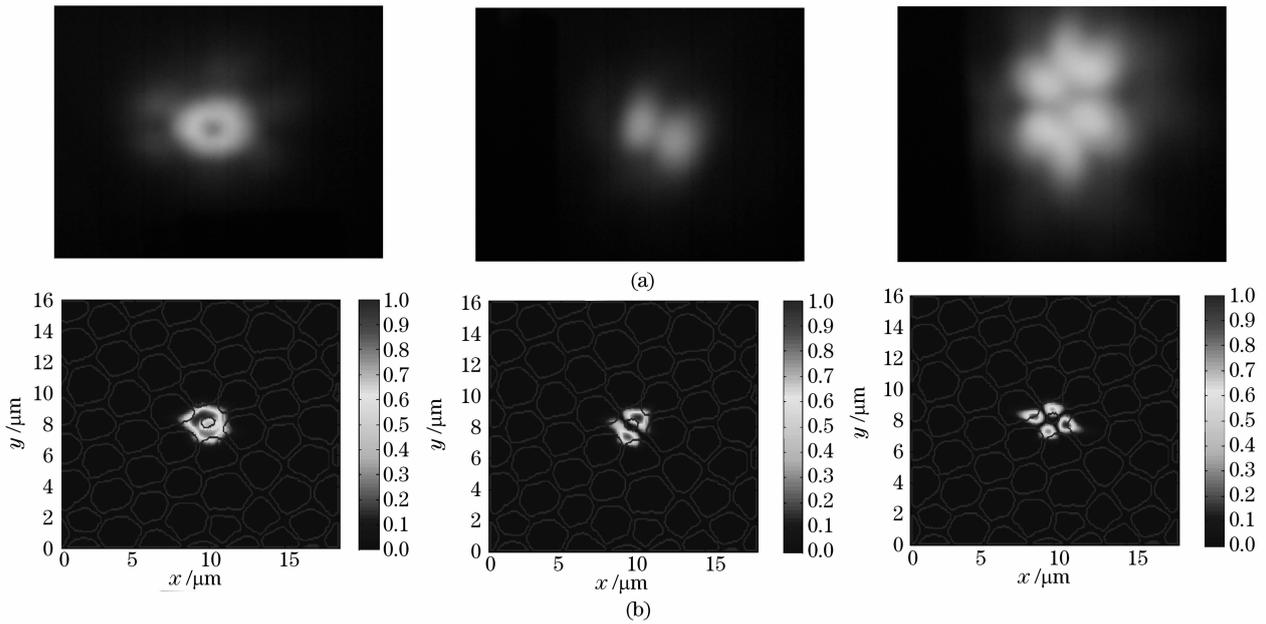


图 5 实际观测到的图像(a)与计算机模拟得到的光纤模场分布(b)的对比

Fig. 5 Comparison of measured (a) and calculated (b) mode fields

5 结 论

结合图像处理算法与频域有限差分法,提出了一种适用于对实际光子晶体光纤的进行数值分析的方法。由于采用直接读入光纤的扫描电镜扫描图像获得光纤截面的信息,从而避免了使用理想光纤模型所带来的误差,并且能够处理形状不规则的任意光子晶体光纤,具有准确和高效的特点。

参 考 文 献

- 1 P. St. J. Russell. Photonic-crystal fibers[J]. *J. Lightwave Technology*, 2006, **24**(12): 4729~4749
- 2 T. A. Birks, J. C. Knight, P. St. J. Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 961~963
- 3 A. Ferrando, E. Silvestre, P. Andres *et al.*. Designing the properties of dispersion-flattened photonic crystal fibers[J]. *Optics Express*, 2001, **9**(13): 687~697
- 4 Fang Hong, Lou Shuqin, Guo Tiejing *et al.*. Novel-high birefringence photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 202~206
方宏, 娄淑琴, 郭铁英等. 一种新结构高双折射光子晶体光纤[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 202~206
- 5 Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(1): 57~66
王清月, 胡明列, 柴路. 光子晶体光纤非线性光学研究新进展[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 57~66
- 6 Liu Jie, Yang Changxi, C. Gu *et al.*. A novel photonic crystal fiber with high nonlinearity and flattened dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1569~1574
刘洁, 杨昌喜, Claire Gu等. 一种新型高非线性色散平坦光子晶体光纤结构[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1569~1574
- 7 K. Saitoh, M. Koshiba. Numerical modeling of photonic crystal fibers[J]. *J. Lightwave Technology*, 2005, **23**(11): 3580~3590
- 8 Z. Zhu, T. G. Brown. Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers [J]. *Optics Express*, 2002, **10**(17): 853~864
- 9 C. Yu, H. Chang. Yee-mesh-based finite difference eigenmode solver with PML absorbing boundary conditions for optical waveguides and photonic crystal fibers [J]. *Optics Express*, 2004, **12**(25): 6165~6177
- 10 M. Koshiba, K. Saitoh. Finite-element analysis of birefringence and dispersion properties in actual and idealized holey-fiber structures[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(31): 6267~6275
- 11 M. Li, J. A. West, K. W. Koch. Modeling effects of structural distortions on air-core photonic bandgap fibers [J]. *J. Lightwave Technology*, 2007, **25**(9): 2463~2468
- 12 N. Otsu. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, **SMC-9**(1): 62~66
- 13 J. N. Kapur, P. K. Sahoo, A. K. C. Wong. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram [J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1985, **29**(3): 273~285
- 14 J. Kittler, J. Illingworth. Minimum error thresholding [J]. *Pattern Recognition*, 1986, **19**(1): 41~47
- 15 Wang Yan. Research of four-wave-mixing and dispersion measurement of photonic crystal fiber [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. 30~51
王妍. 光子晶体光纤中四波混频效应与色散测量的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007. 30~51
- 16 Hu Minglie, Wang Qingyue, Li Yanfeng *et al.*. Frequency conversion in a birefringent microstructure fiber by femtosecond pulses[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(5): 613~616
胡明列, 王清月, 栗岩峰等. 飞秒激光脉冲在双折射微结构光纤中频率变换的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(5): 613~616
- 17 Q. Wang, B. Yang, L. Zhang *et al.*. Experiment study of wavelength conversion in a dispersion-flattened photonic crystal fiber[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(9): 538~539