

文章编号: 0253-2239(2010)s100216

光子晶体光纤色散特性的数值计算与实验研究

王泽锋 靳爱军 刘小明 侯 静

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 色散是光子晶体光纤最为重要的特征参量之一。在分析当前各数值计算方法特点的基础上,将最简单的经验公式法和基于多级法的光学系统超高频免设备(CUDOS)仿真软件结合起来,对全内反射型光子晶体光纤的色散特性进行了数值计算,分析了孔径 d 、孔间距 Λ 以及 d/Λ 对色散的影响,得到了一些对于光子晶体光纤的设计具有一定的指导意义的结论。同时,利用之前搭建的基于超连续谱白光干涉仪的超宽波段、高精度色散测量系统,对孔径 $d=2.17\ \mu\text{m}$ 、孔间距 $\Lambda=3.47\ \mu\text{m}$ 的全内反射型光子晶体光纤的色散系数进行了测量。实验结果与数值计算的结果基本吻合,零色散点基本一致,理论值和实验值分别为 $1.018\ \mu\text{m}$ 和 $0.973\ \mu\text{m}$,较好地验证了数值计算方法和色散测量系统的有效性。

关键词 光子晶体光纤;数值计算;色散特性;色散测量

中图分类号 TN929.11; O436.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100216

Numerical and Experimental Investigations on Dispersion Properties of Photonic Crystal Fibers

Wang Zefeng Jin Aijun Liu Xiaoming Hou Jing

(College of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Dispersion is one of the most significant parameters of photonic crystal fibers. The dispersion properties of total internal reflection photonic crystal fibers are numerically studied using the simple empirical relation method and CUDOS simulation software, which is based on the multipole method, by analyzing various numerical methods available currently. And the effects of air hole diameter d , hole pitch Λ , and d/Λ on the dispersion properties are numerically investigated in details, and some results, which are useful for design of photonic crystal fibers, are given. A photonic crystal fiber, whose length is 328 mm, hole diameter is $2.17\ \mu\text{m}$, and hole pitch is $3.47\ \mu\text{m}$, is tested using the ultra-broadband and high precision dispersion measurement system constructed previously, which is based on white light interferometer using supercontinuum as the light source. The experimental dispersion curve is well in agreement with the numerical results, and the tested zero-dispersion wavelength and the numerical value are $0.973\ \mu\text{m}$ and $1.018\ \mu\text{m}$ respectively, which well verify the validities of the numerical method and the measuring system.

Key codes photonic crystal fibers; numerical computations; dispersion properties; dispersion measurement

OCIS codes 060.0060; 060.2310; 060.2400

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)又称为多孔光纤或微结构光纤^[1],根据导光机制,分为全内反射型和光子带隙

型两种^[2,3]。由于包层中空气孔微结构设计的灵活性,PCF具有无截止单模、大模场面积、极强的非线性效应、高双折射效应和色散灵活可控等诸多优异

收稿日期: 2010-06-25; **收到修改稿日期**: 2010-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(11004247)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0142)和国防科学技术大学科研计划(JC09-07-01)资助课题。

作者简介: 王泽锋(1980—),男,博士,讲师,主要从事光纤传感和光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: hotrosemaths@163.com

的特性,在色散补偿性、超连续谱的产生、光纤传感和光纤通信等方面拥有巨大的应用前景,已经成为近年来国内外研究的热点^[4~8]。

色散特性是 PCF 最为重要的特性之一,目前有很多数值计算的方法,主要包括有效折射率法^[2]、全矢量平面波展开法^[9]、时域有限差分法、有限元法^[10]和多级法^[11,12]等。其中全矢量平面波展开法、时域有限差分法和有限元法通过精确求解麦克斯韦方程得到色散特性,精度非常高,但是它们的缺点是计算量非常大,不适合快速计算。有效折射率法将全内反射型 PCF 等效为阶跃型光纤进行研究,可以方便借鉴传统光纤的色散计算方法。特别是基于有效折射率法得到的经验公式,结果仅依赖于 PCF 的孔径 d 和孔间距 Λ ,无需进行复杂的数值计算,非常适宜于快速计算和设计^[13]。但是,经验公式法不适用于带隙型 PCF,而且结果表明当 $d/\Lambda > 0.8$ 时,计算结果不再准确。多级法将电场和磁场分量在各个圆柱坐标系内表示为贝塞尔函数的形式,利用边界条件求解 Helmholtz 方程,非常适用于空气孔为圆形的 PCF。基于多级法开发的 CUDOS 是一款较为成熟的仿真软件,使用起来较为方便,而且其科学性和准确性也已得到理论和实践的证实,但计算量较大、耗时较长。可见,各种方法都有其优缺点,应根据实际需求选择适当的计算方法。

为了获得一种快速、方便且较为精确的色散计算方法,本文结合经验公式法和 CUDOS 仿真软件的优点,编写了一套适用与全内反射型 PCF 的色散仿真程序,对实心 PCF 的色散特性进行了数值计算与分析,给出了一些有用的结论。利用超连续谱白光干涉仪测量系统,对某一结构参数的 PCF 色散系数进行了测量,并将实验结果与数值计算的结果进行比较,一致性较好。

2 数值计算方法

图 1 为全内反射型光子晶体光纤横截面示意图,分为纤芯区和包层区。其中包层区由三角形均匀排列的空气孔构成,其中孔径为 d ,空间距为 Λ ,材料为石英玻璃。经验公式法,是利用数据拟合的方法解光纤归一化频率 V 参数和横向播常数 W 参数,进而求解色散的一种方法。

V 参数和 W 参数与有效折射率有如下关系^[13]

$$V = \frac{2\pi a_{\text{eff}}}{\lambda} \sqrt{n_{\text{co}}^2 - n_{\text{FSM}}^2}, \quad (1)$$

$$W = \frac{2\pi a_{\text{eff}}}{\lambda} \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_{\text{FSM}}^2}, \quad (2)$$

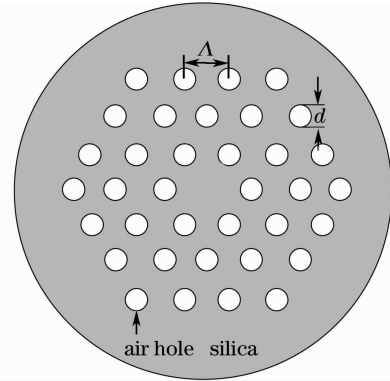


图 1 全内反射型光子晶体光纤

Fig. 1 Total internal reflection photonic crystal fibers

式中 λ 是工作波长, a_{eff} 为有效纤芯半径, n_{co} 为纤芯折射率, n_{FSM} 为包层折射率, n_{eff} 为基模有效折射率。在经验公式法中,取 $a_{\text{eff}} = d/\sqrt{3}$,则 V 参数和 W 参数可由下面的经验公式直接得到

$$V\left(\frac{\lambda}{\Lambda}, \frac{d}{\Lambda}\right) = A_1 + \frac{A_2}{1 + A_3 \exp(A_4 \lambda/\Lambda)}, \quad (3)$$

$$W\left(\frac{\lambda}{\Lambda}, \frac{d}{\Lambda}\right) = B_1 + \frac{B_2}{1 + B_3 \exp(B_4 \lambda/\Lambda)}, \quad (4)$$

式中 A_i 和 B_i 为只与 d/Λ 有关的参量,可表达成^[13]

$$A_i = a_{i0} + a_{i1} \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^{b_{i1}} + a_{i2} \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^{b_{i2}} + a_{i3} \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^{b_{i3}}, \quad (5)$$

$$B_i = c_{i0} + c_{i1} \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^{d_{i1}} + c_{i2} \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^{d_{i2}} + c_{i3} \left(\frac{d}{\Lambda}\right)^{d_{i3}}, \quad (6)$$

式中 a_{ij} 和 c_{ij} 为数据拟合得到的系数^[13],分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 (5)式中的拟合系数

Table 1 Fitting coefficients in Eq. (5)

	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$
a_{i0}	0.54808	0.71041	0.16904	-1.52736
a_{i1}	5.00401	9.73491	1.85765	1.06745
a_{i2}	-10.43248	47.41496	18.96849	1.93229
a_{i3}	8.22992	-437.50962	-42.4318	3.89
b_{i1}	5	1.8	1.7	-0.84
b_{i2}	7	7.32	10	1.02
b_{i3}	9	22.8	14	13.4

表 2 (6)式中的拟合系数
Table 2 Fitting coefficients in Eq. (6)

	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$
c_{i0}	-0.0973	0.53193	0.24876	5.29801
c_{i1}	-16.70566	6.70858	2.72423	0.05142
c_{i2}	67.13845	52.04855	13.28649	-5.18302
c_{i3}	-50.25518	-540.66947	-36.80372	2.7641
d_{i1}	7	1.49	3.85	-2
d_{i2}	9	6.58	10	0.41
d_{i3}	10	24.8	15	6

由(1)式和(2)式可得

$$n_{\text{eff}}^2 = n_{\text{co}}^2 + \frac{3\lambda^2}{4\pi^2 d^2} (W^2 - V^2), \quad (7)$$

式中纤芯折射率 n_{co} 由 Sellmeier 方程给出^[14]

$$n_{\text{co}}^2 = 1 + \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2}, \quad (8)$$

对于石英玻璃,取 $m=3$ 即可达到较高的精度,相应各系数为: $\alpha_1 = 0.6961663$, $\alpha_2 = 0.4079426$, $\alpha_3 = 0.8974794$, $\lambda_1 = 0.0684043 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 0.1162414 \mu\text{m}$, $\lambda_3 = 9.8961610 \mu\text{m}$ 。

将有效折射率 n_{eff} 代入色散系数定义式

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2}, \quad (9)$$

即可求得全内反射型光子晶体光纤的群速度色散,其中包括了材料色散。

根据以上经验公式及其系数,分别对 V 参数和 W 参数进行了数值计算,结果如图 2 和图 3 所示。

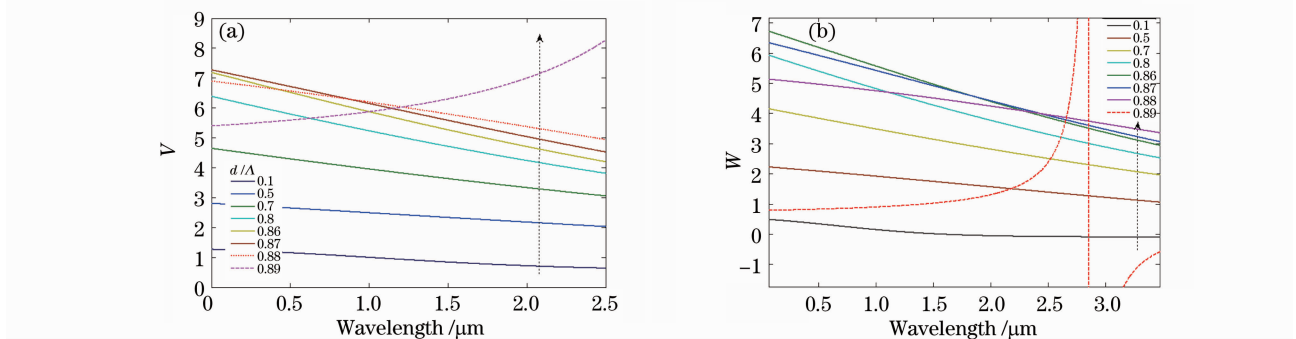


图 2 V 参数和 W 参数在不同 d/Λ 情况下随波长的变化

Fig. 2 V parameter and W parameter as functions of λ with different d/Λ

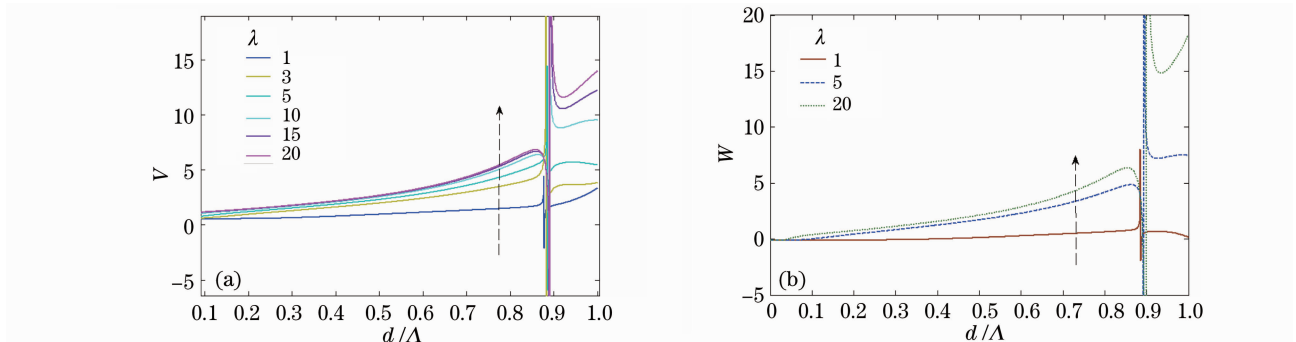


图 3 V 参数和 W 参数在波长 λ 取一定值时随 d/Λ 的变化

Fig. 3 V parameter and W parameter as functions of d/Λ with different λ

从图 2 可见,随着 d/Λ 的增加, W 参数在 $d/\Lambda = 0.86$ 就开始出现反常, V 参数在 $d/\Lambda = 0.87$ 时开始出现反常。

从图 3 可见,当 $d/\Lambda > 0.8$ 时 V 参数和 W 参数随着 d/Λ 的增加均出现异常,在 d/Λ 为 $0.88 \sim 0.9$ 之间出现剧烈振荡。因此,为了保证一定的计算精度,经验公式法只适用于 $d/\Lambda \leq 0.8$ 的情况。其主要原因是,随着 d/Λ 的增加,即空气填充率增大,包层和纤芯的折射率差逐渐变大,经验公式法必须满足的弱导条件慢慢失去,使得计算出现混乱现象,计算

结果不再准确。因此,在下面的仿真中,当 $d/\Lambda \leq 0.8$ 时计算结果由上面介绍的经验公式给出,当 $d/\Lambda > 0.8$ 时由 CUDOS 仿真软件计算给出。

3 数值计算结果与分析

3.1 相同孔间距 Λ 下,孔径 d 对 PCF 色散特性的影响

图 4 为一定孔间距 Λ 下,PCF 色散特性随孔径 d 的变化情况,对应取值 $\Lambda = 4.0 \mu\text{m}$ 。图中 8 条曲线按箭头所指方向,由下到上孔径 d 分别为 $0.8, 1.2,$

1.6, 2.0, 2.4, 2.8, 3.2 和 3.6 μm 。其中 $d = 3.6 \mu\text{m}$ 时, $d/\Lambda > 0.8$, 采用 CUDOS 软件进行计算, 其余曲线均有经验公式计算得到。由图中可见, 当孔间距 Λ 不变时, 随着孔径 d 的增加, 即随着空气填充率的增加, 色散曲线斜率逐渐增加, 零色散点向短波方向移动。同时, 由于 CUDOS 软件计算中的不稳定性, 且在由折射率计算色散时采用了差分代替微分, 使得 $d=3.6$ 对应的曲线在波长从 1.2~1.5 μm 区域出现了小幅振荡。

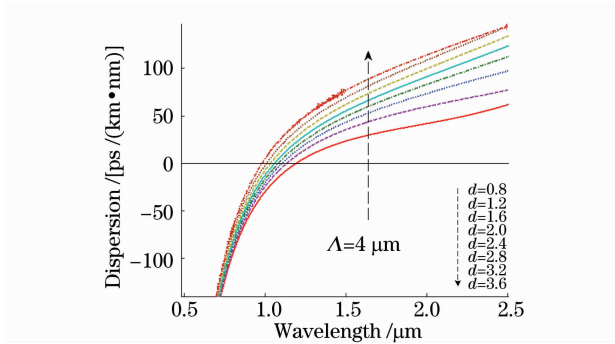
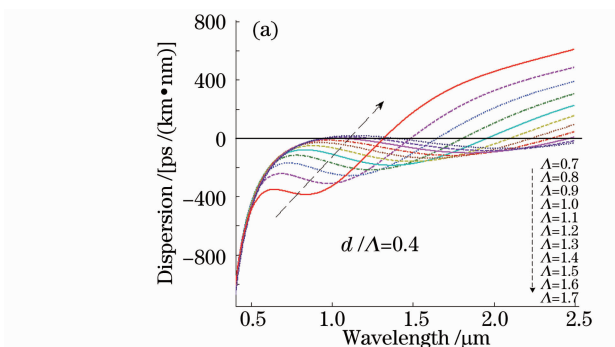


图 4 $\Lambda=4 \mu\text{m}$ 时, d 对 PCF 色散特性的影响

Fig. 4 When $\Lambda=4 \mu\text{m}$, effects of d on dispersion properties of photonic crystal fibers

3.2 相同孔径 d 下, 孔间距 Λ 对 PCF 色散特性的影响

图 5 为一定孔径 d 下, PCF 色散特性随孔间距 Λ 的变化情况, 对应取值 $d=2.0 \mu\text{m}$ 。图中顺箭头所指方向, 孔间距 Λ 依次为 2.01, 2., 2.2, 2.5, 3, 4, 6, 10 和 20 μm , 其中 Λ 为 2.01, 2.1 和 2.2 μm 时, $d/\Lambda > 0.8$, 采用 CUDOS 软件进行计算, 其余曲线均有经验公式计算得到。从图中可见, 当孔径 d 不变时, 随着孔间距 Λ 的减小, 即随着空气填充率的



增加, 色散曲线逐渐出现一个极大值, 再减小 Λ , 则色散曲线出现两个零色散点, 且随着 Λ 的减小, 两个零色散点都向短波方向移动。

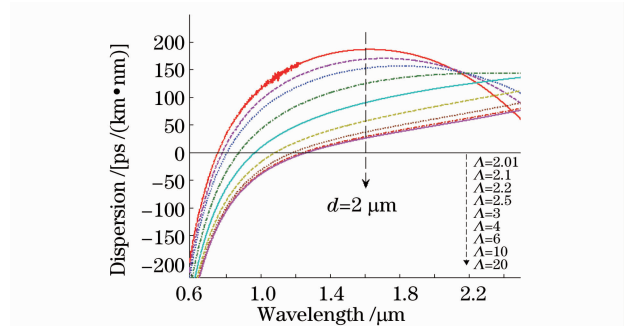


图 5 $d=2 \mu\text{m}$ 时, 孔间距 Λ 的变化对 PCF 色散特性的影响

Fig. 5 When $d=2 \mu\text{m}$, effects of Λ on dispersion properties of photonic crystal fibers

3.3 相同 d/Λ 下, 孔间距 Λ 对 PCF 色散特性的影响

图 6 为 d/Λ 一定时, 取 $d/\Lambda=0.4$, PCF 色散特性随孔间距 Λ 的变化情况, 其中图 6(a) 对应的 Λ 较小 ($\Lambda < 2 \mu\text{m}$), 图 6(b) 对应的 Λ 较大 ($\Lambda > 2 \mu\text{m}$)。从图中可见, 在两种尺寸范围下, PCF 色散系数随孔间距 Λ 的变化规律有所不同: 如图 6(a) 所示, 当 Λ 相对较小 ($\Lambda < 2 \mu\text{m}$) 时, 色散曲线存在两个极值点, 一个极大值点和一个极小值点, 随着 Λ 的增加, 两个极值点以近似相同的速度增大, 极值点对应的波长均向长波方向移动, 且极小值移动的速度大于极大值移动的速度, 因此使得色散平坦区变宽; 如图 6(b) 所示, 当 Λ 相对较大 ($\Lambda > 2 \mu\text{m}$) 时, 随着 Λ 的增加, 零色散点向长波方向移动, 当 $\Lambda > 10 \mu\text{m}$ 以后, PCF 色散曲线变化很小, 说明此时 d/Λ 对色散特性起主导作用, 改变光纤结构绝对尺寸对色散影响不大。

图 6 $d/\Lambda=0.4$ 时, 空气孔间距 Λ 的变化对 PCF 色散特性的影响。(a) Λ 较小, (b) Λ 较大

Fig. 6 When $d/\Lambda=0.4$, effects of Λ on dispersion properties of photonic crystal fibers. (a) with small Λ , (b) with big Λ

4 实验结果与分析

利用搭建的基于超连续谱白光干涉仪的色散测

量系统^[15], 对武汉烽火公司拉制的一段长约 328 mm 的全内反射光子晶体光纤进行了测量。光

子晶体光纤结构参数为：孔径 $d=2.17 \mu\text{m}$ ，孔间距 $\Lambda=3.47 \mu\text{m}$ ，其电镜扫描图(SEM)如图 7 所示。

实验中，对从 470~1000 nm 内的 17 个波长进行了测量。对应每一个波长，控制电动平移台上的

相移镜进行扫描可以得到一组干涉图样，从各干涉图中可以找到干涉最大的位置，即为两臂光程相等处，分别记录相应的电控移动平台位置，如表 3 所示。

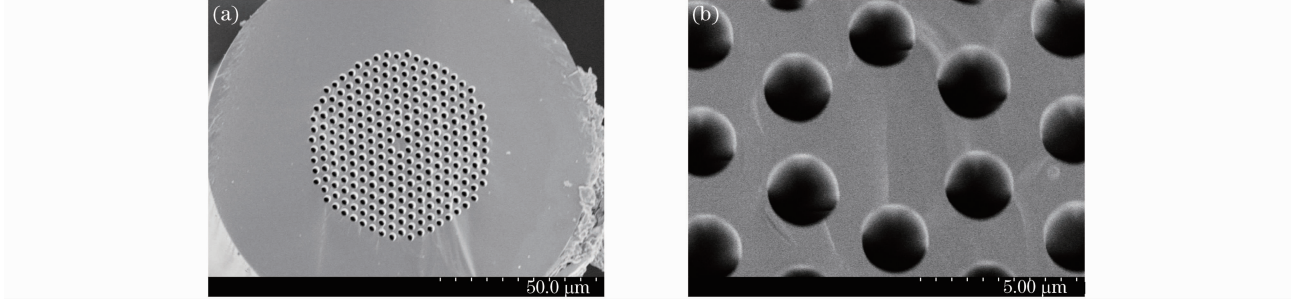


图 7 待测光纤电镜扫描图。(a)光纤截面图,(b)纤芯区域近景图

Fig. 7 SEM image of the PCF under test. (a) fiber cross section, (b) a close up of the core region

表 3 干涉最强时各波长对应的相移镜位置

Table 3 Position of the mirror against wavelength while interfering best

$\lambda / \mu\text{m}$	0.470	0.492	0.505	0.530	0.546	0.578	0.610	0.632	0.660
x / mm	10.408	9.759	9.403	8.866	8.544	8.309	7.620	7.386	7.128
$\lambda / \mu\text{m}$	0.700	0.766	0.780	0.808	0.850	0.870	0.900	1.000	
x / mm	6.804	6.430	6.376	6.290	6.177	6.137	6.092	6.050	

图 8(a)是由表 3 的数据拟合得到的干涉最强位置 x 随波长 λ 的变化关系曲线,其表达式为

$$x(\lambda) = 3.5800 + 0.0524\lambda^{-4} + 1.2230\lambda^{-2} + 0.8712\lambda^2 + 0.3248\lambda^4, \quad (10)$$

式中波长 λ 单位取 μm ，干涉最强位置单位取 mm。

图 8(b)为光子晶体光纤的色散系数曲线。由于该光子晶体光纤的 $d/\Lambda=0.625 < 0.8$ ，理论色散曲线(图中实线所示)由上面介绍的经验公式计算得到;图中虚线是对图 8(a)中由实验数据拟合得到的曲线进行求导给出,其表达式为

$$D = -4.2626\lambda^{-5} - 49.7154\lambda^{-3} + 35.4146\lambda + 26.4065\lambda^3, \quad (11)$$

式中色散系数 D 单位取 $\text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ 。

从图 8(b)可见,实验结果与数值计算的结果基本吻合,零色散点基本一致,理论值和实验值分别为 $1.018 \mu\text{m}$ 和 $0.973 \mu\text{m}$ 。实验误差主要来源与实际测量的光纤与数值计算的光纤存在结构参数的细微差异。此外,光源功率的波动、杂散光干扰、数据的读取与处理等也会引入一定的误差。

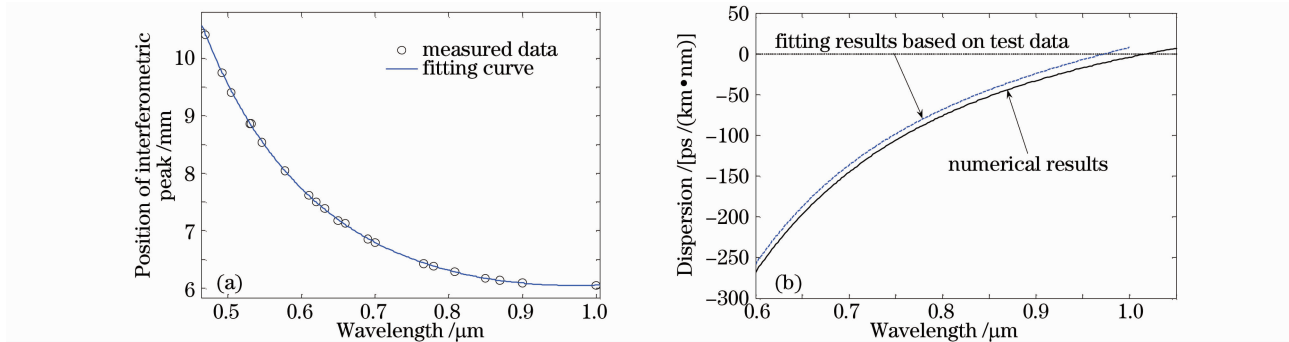


图 8 (a)干涉最强时相移镜位置对于波长的拟合曲线,(b)色散曲线测量值与数值计算结果的对比

Fig. 8 (a) Fitting curve of the position of the mirror with wavelength while interfering best, (b) dispersion of PCF under test

5 结 论

本文将经验公式法和基于多级法的 CUDOS 仿

真软件结合起来,建立了一套有效的全内反射型光子晶体光纤的色散仿真系统,并利用该系统仿真分

析了孔径 d 、孔间距 Λ 以及 d/Λ 对光子晶体光纤色散特性的影响,得到了一些有意义的结论,对于光子晶体光纤的设计具有一定的指导意义。同时,利用之前搭建的基于光子晶体光纤的超连续谱白光干涉仪色散测量系统,对 $d=2.17\ \mu\text{m}$, $\Lambda=3.47\ \mu\text{m}$ 的全内反射型光子晶体光纤的色散特性进行了实验测量。实验结果与数值计算的结果基本吻合,零色散点基本一致,较好地验证了数值计算方法和色散测量系统的有效性。

参 考 文 献

- 1 J. C. Knight, T. A. Birks, P. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 2 T. A. Birks, J. C. Knight, P. J. Russell *et al.*. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 961~963
- 3 J. C. Knight, J. Broeng, T. A. Birks *et al.*. Russell photonic band gap guidance in optical fibers [J]. *Science*, 1998, **282**(5393): 1476~1478
- 4 J. C. Knight, P. J. Russell. New ways to guide light [J]. *Science*, 2002, **296**(5566): 276~277
- 5 P. J. Russell. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, **299**(5605): 358~362
- 6 P. St. J. Russell. Photonic crystal fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(12): 4729~4749
- 7 Yuan Jinhui, Hou Lantian, Zhou Guiyao *et al.*. Investigation of a step-structure photonic crystal fiber with flattened dispersion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1167~1171
- 苑金辉, 侯蓝田, 周桂耀 等. 一种阶梯结构的色散平坦光子晶体光纤的研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1167~1171
- 8 Wang Honghua, Xue Wenrui, Zhang Wenmei. Negative dispersion properties of photonic crystal fiber with dual core and composite lattice [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 27~30
- 王红华, 薛文瑞, 张文梅. 双芯复合格点光子晶体光纤的负色散特性 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 27~30
- 9 A. Ferrando, E. Silvestre, J. J. Miret *et al.*. Fullvector analysis of a realistic photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(4): 276~278
- 10 M. Szpulak, W. Urbanczyk, E. Serebryannikov *et al.*. Comparison of different methods for rigorous modeling of photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(12): 5699~5714
- 11 T. P. White, B. T. Kuhlmeiy, R. C. McPhedran *et al.*. Multipole method for microstructured optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(10): 2322~2330
- 12 B. T. Kuhlmeiy, T. P. White, G. Renversez *et al.*. Multipole method for microstructured optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(10): 2331~2340
- 13 Kunimasa Saitoh, Masanori Koshiba. Empirical relations for simple design of photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(1): 267~274
- 14 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. New York: Academic Press, 2007. 6~7
- 15 Wang Zefeng, Liu Xiaoming, Hou Jing. Broadband dispersion measurement of PCF based on supercontinuum white light interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1496~1500
- 王泽锋, 刘小明, 侯静. 基于超连续谱白光干涉仪的宽波段 PCF 色散测量 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1496~1500