

实芯保偏光子晶体光纤散射测量与分析

宋凝芳, 胡雪妍*, 徐小斌, 蔡伟, 高福宇

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

摘要 实芯保偏光子晶体光纤在双折射、温度、抗辐照等方面具有独特的优势, 非常适合于光纤陀螺应用, 然而其损耗较大, 影响着光子晶体光纤陀螺性能的提高, 空气孔内壁表面粗糙度引起的散射是导致损耗的原因之一。针对实芯保偏光子晶体光纤散射损耗, 建立了光纤散射模型, 仿真计算散射损耗为 0.179 dB/km; 搭建了全自动测试装置, 测量灵敏度可达 1 pW, 散射角测量范围可达 15°~165°, 光纤旋转角度分辨率可达 1°, 实现了三维散射球的测量, 得到散射损耗为 0.23 dB/km, 验证了理论仿真结果的可靠性。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤; 散射损耗; 散射分布测量; 实芯保偏光子晶体光纤

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.010601

Measurement and Analysis of Scattering in Solid-Core Polarization-Maintaining Photonic Crystal Fibers

Song Ningfang, Hu Xueyan*, Xu Xiaobin, Cai Wei, Gao Fuyu

School of Instrument Science and Opto-Electronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract The solid-core polarization-maintaining photonic crystal fiber is very suitable for the application of the fiber optic gyro because of its unique advantages in birefringence, temperature, and radiation resistance. However, the loss is large, which affects the improvement of the performance of the photonic crystal fiber gyro. The scattering caused by the surface roughness of the air hole inner wall is one of the causes of the loss. For the scattering loss of the solid-core polarization-maintaining photonic crystal fiber, a fiber scattering model is established, and the simulation result of the scattering loss is 0.179 dB/km. A fully automatic test device is built with a measurement sensitivity of 1 pW, a scattering angle measurement range of 15° to 165°, and a fiber rotation angle resolution of 1°, the measurement of a three-dimensional scattering ball is realized. And the measured scattering loss of the fiber is 0.23 dB/km, which is in agreement with the theoretical simulation result.

Key words fiber optics; photonic crystal fibers; scattering loss; scattering distribution measurement; solid-core polarization-maintaining photonic crystal fibers

OCIS codes 060.5295; 060.2420; 060.2300; 060.2800

1 引言

光纤陀螺是基于萨尼亚克效应^[1]发展起来的一种新型角速度传感器, 较其他陀螺而言, 具有启动时间短、结构简单、重量轻等优点^[2], 已成为主流惯性部件。在光纤陀螺中, 光纤是核心器件之一。实芯保偏光子晶体光纤(PM-PCF)较普通光纤而言, 更利于横向磁场误差的抑制, 其双折射率大^[3]、温度稳定性好, 具有抗辐射的能力, 设计自由度大, 弯曲损

耗低^[4], 在以光纤陀螺为代表的光纤传感领域发挥巨大的作用, 是目前光纤陀螺发展的趋势。针对光纤陀螺的应用, 提出了一种 $\Phi 135 \mu\text{m}$ 4 层结构的实芯保偏光子晶体光纤^[5], 但在 1550 nm 处损耗约为 2 dB/km, 相比传统光纤损耗较大, 因而降低了光纤陀螺的信噪比, 制约了实芯保偏光子晶体光纤在陀螺中的应用。

实芯保偏光子晶体光纤内部结构存在很多空气孔, 在拉制过程中, 熔融玻璃与空气的分界面上存在

收稿日期: 2018-06-05; 修回日期: 2018-07-11; 录用日期: 2018-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(61575012, 61575013)、国家重大科学仪器专项基金(2013YQ040877)

* E-mail: huxueyan@buaa.edu.cn

着细小的纹波。当玻璃急速冷却时,这些毛细波纹也随之迅速凝固而形成表面毛细波(SCW),导致光纤空气孔内壁表面不平坦^[6]。这种由于热动力学^[7]而引起的粗糙度会在光纤中引起散射损耗。散射损耗是实芯保偏光子晶体光纤中的一种重要损耗,需要对其进行精确测量,从而为定位和减小实芯保偏光子晶体光纤损耗奠定基础。几十年来,角分辨散射(ARS)测量法普遍用于平面波导逃逸光测量^[8],改进装置后可用于单模光纤^[9]、实芯非保偏光子晶体光纤^[6]与空芯光子晶体光纤^[10]的散射损耗测试。其中,文献^[10]的测量装置中使用了一个线性阵列CCD,用来接收在一定范围内不同角度上的散射光。然而阵列CCD会导致测量散射角的范围受限,并且测量的散射光均来自同一个平面内,无法得到整个

空间内散射光的分布。

本文针对实芯保偏光子晶体光纤的散射,建立了光纤模型进行仿真计算,设计并搭建装置来测量光纤在三维空间中的散射分布,采用仿真与实验相结合的方法分析了实芯保偏光子晶体光纤的散射损耗,为定位及减小光纤损耗奠定基础。

2 理论建模与计算

理论上光子晶体光纤的极限最小散射损耗来自于纤芯内壁的表面毛细波,其粗糙表面在微观下可看作许多不规则的玻璃毛刺,这些偏离理想空气-玻璃分界面的任意扰动可视为诱导电偶极子^[11]。基于这种偶极子辐射模型理论,光纤的散射损耗 L_{sc} 可根据下式计算得出:

$$\begin{cases} P(\theta, \phi) = \frac{2L}{4\pi} cn\epsilon_0 \left(\frac{k^2 \alpha_0}{4\pi\epsilon} \right)^2 \sin\theta \cdot S(\beta - k \cos\theta) \cdot \int_{\phi}^{\phi+\Delta\phi} \left| \sum_j \oint \exp(-iky' \sin\theta) \cdot (\mathbf{E}_{ou} \hat{\mathbf{u}} + \mathbf{E}_{ov} \hat{\mathbf{v}}) ds_j \right|^2 d\phi, \\ L_{sc} = -\frac{10}{L} \lg \left[1 - \frac{\pi}{P_0} \int_{\theta=0}^{\pi} \sum_{\phi} P(\theta, \phi) d\theta \right] \end{cases}, \quad (1)$$

式中 L 为光纤长度, ϵ_0 为真空介电常数, $\alpha_0 \approx 0.715 \epsilon_0$, β 为空间频率, $S(\beta - k \cos\theta)$ 为光纤内壁粗糙度功率谱密度。光纤在空间内的散射如图1所示^[11], z 正向为光纤中光的传输方向, P 为空间中任意一点, θ 和 ϕ 分别为径向散射角和光纤方位角, $P(\theta, \phi)$ 是空间内散射角为 θ 且方位角为 ϕ 位置处的散射功率, $y' = y \cos\phi - x \sin\phi$, s_j 为偶极子模型的表面弧长, $\hat{\mathbf{u}}$ 和 $\hat{\mathbf{v}}$ 分别为两个单位向量, \mathbf{E}_{ou} 和 \mathbf{E}_{ov} 分别为这两个方向的电场分量。

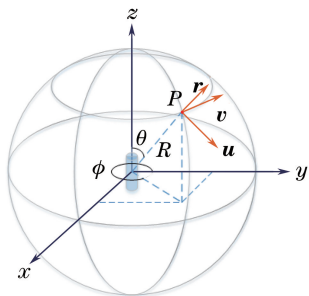


图1 散射球示意图

Fig. 1 Diagram of scattering ball

为了分析实芯保偏光子晶体光纤的散射分布规律,计算其理论极限散射损耗,现基于有限元法建立其散射模型,如图2所示,仿真计算出基模的有效折射率与光纤截面所有分界面上的电场分布。代入

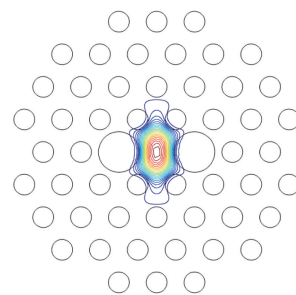


图2 实芯 PM-PCF 散射模型

Fig. 2 Scattering model of solid core PM-PCF

(1)式中可计算出散射分布 $P(\theta, \phi)$ 和散射损耗 L_{sc} 。

若光纤入射功率为 P_0 ,则图3为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内不同方位角 ϕ 下散射率 $P(\theta, \phi)/P_0$ 随散射角 θ 的变化。可以看出,整体分布趋势随 θ 的减小而变大,在中间位置处散射率随 ϕ 的变大而变大,当 $\phi = 0^\circ$ 时凹陷最明显, $\phi = 90^\circ$ 时完全无凹陷。说明散射分布与光纤纤芯大孔有关,中心与大孔连线方向的散射光最弱,不经过大孔的方向散射光最强。

图4为散射率 $P(\theta)/P_0$ 随 θ 的分布规律,其中 $P(\theta) = \sum_{\phi} P(\theta, \phi)$,为 $P(\theta, \phi)$ 绕方位角 ϕ 方向一周的功率和。可以看出,较小散射角处散射强度比较大,且两端存在截止角度。当散射光从纤芯向外

逸出时,光纤与外界的玻璃-空气分界面上较大和较小的散射角会由于光的全反射而无法向外折射。由图可知,光纤在靠近 0° 和 180° 的方向没有散射光,且散射光在靠近光纤出射光方向强度较大。

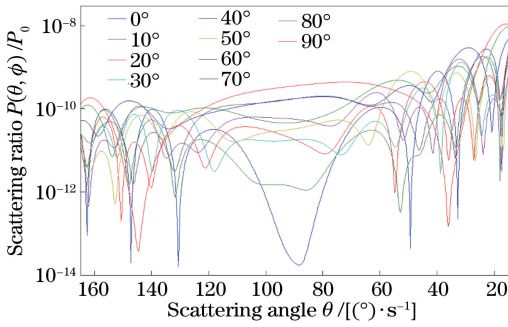


图3 不同方位角下散射率分布

Fig. 3 Scattering ratio in different azimuth angles

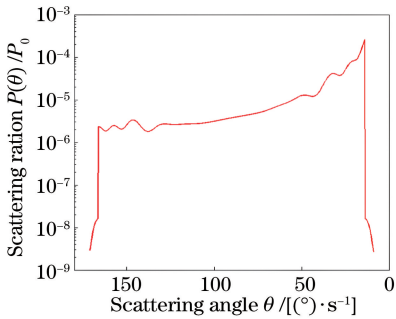


图4 散射率 $P(\theta)/P_0$ 分布

Fig. 4 Distribution of scattering ratio $P(\theta)/P_0$

将所有散射功率积分可得到光纤总的散射损耗,根据(1)式可以计算出实芯保偏光子晶体光纤散射损耗 $L_{sc} = 0.1793$ dB/km。

3 实验方法

3.1 测量装置与方法

根据第2节中讨论的损耗计算方法,实验中需测量散射功率空间分布 $P(\theta, \phi)$ 与入射功率 P_0 。为了实现三维空间内的扫描测量,实验装置如图5所示^[10],分为光纤测量模块与信号处理模块。测量模块中使用了有效测量面为 $\Phi 3$ mm 的光电探测器来接收散射光,并将探测器固定在转台上,探测器与光纤中心的连线与光纤中入射光方向的夹角为 θ 。将光纤两端固定在两个同步步进电机的旋转轴承上,带动待测光纤绕自身轴线旋转,旋转方位角为 ϕ 。将玻璃圆筒注满匹配液,形成圆柱形透镜,使同一角度的散射光会聚到焦点处的探测器。装置采用外径 50 mm 的圆筒,其焦距为 80 mm,如图6所示,探测器于焦点处绕筒旋转测量。相比文献^[10]中的测试装置,散射角 θ 的测量范围大大提高,可以达到 $15^\circ \sim 165^\circ$;测量维度从二维提升为三维,满足需要测量光纤散射功率球的要求,并且旋转过程中方位角 ϕ 的分辨率可以达到 1° ,精确度较高;测量过程实现了自动控制,操作更为简便。

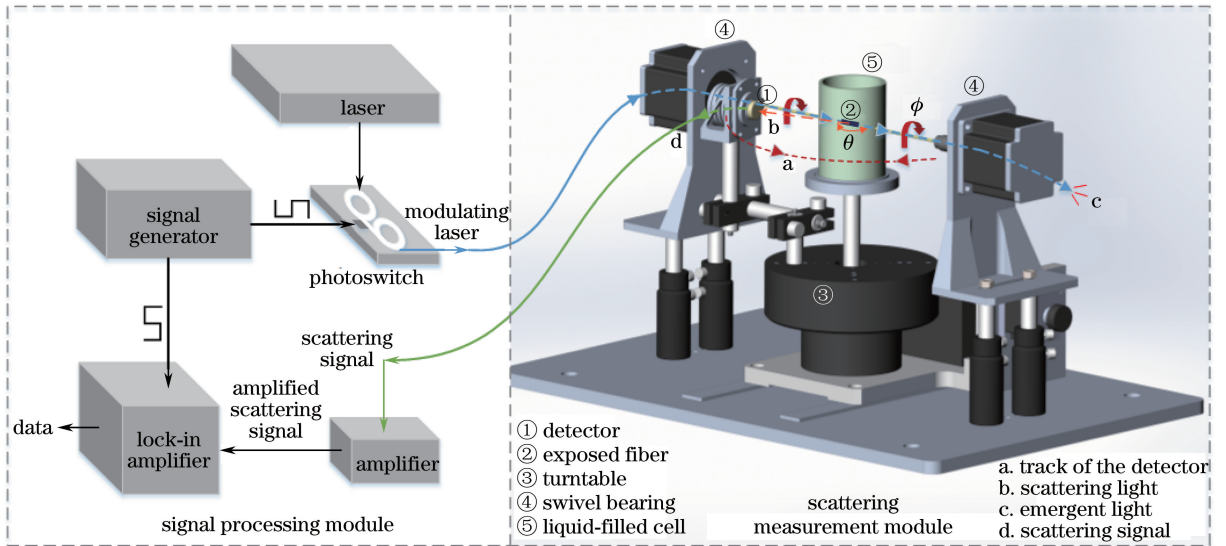


图5 光纤散射测量平台

Fig. 5 Fiber scattering measurement equipment

实验采用暗电流噪声小的制冷型探测器与放大倍数为 10^7 的放大器,但散射信号仍淹没于噪声中,难以直接测量,因此在信号处理模块中采用相干检测的方法^[12],不仅提高了测试精度,还增加了动态

范围。实验采用光开关对光源进行调制,产生与锁相放大器调制信号同频的散射信号。通过相干检测的方法,实现了微弱散射功率的测量,测量灵敏度可达到 1 pW。

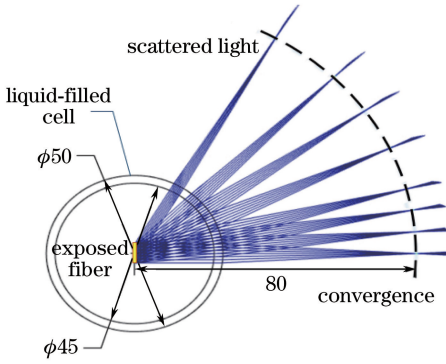


图 6 散射光焦点位置仿真图

Fig. 6 Simulation of focus position of scattered light

3.2 实验数据的计算

3.1 节中测量了不同 θ 和 ϕ 下的散射功率 $P_{\theta\phi}$ ，将其在两个维度上求和可得到待测裸纤的总散射功率。实验测得的光纤散射损耗 L'_{sc} 计算式为

$$\begin{cases} \Delta\theta = \omega \Delta T_{\text{sampling}} \\ P_{\text{scattering}} = \sum_{\phi=0}^{2\pi} \sum_{\theta=0}^{\pi} P_{\theta\phi} \frac{\Delta\phi}{\Delta\phi_{\text{detector}}} \Delta\theta \\ L'_{sc} = -\frac{1}{\Delta L} 10\lg \frac{P_0 - P_{\text{scattering}}}{P_0} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $P_{\text{scattering}}$ 为测量的总散射功率, $P_{\theta\phi}$ 为测得的空间某一点的散射光功率, P_0 为耦合进裸纤部分的入射光功率。 $\Delta\phi$ 为光纤方位角旋转间隔, $\Delta\phi_{\text{detector}}$ 为光电探测器有效测量面所接收到的光纤截面散射光的角度, $\Delta\theta$ 为散射平面内探测器测量的两点之间的角度间隔, ω 为转台的角速度, $\Delta T_{\text{sampling}}$ 为采集软件的采样间隔, ΔL 为裸纤长度。

4 实验结果与分析

使用电子显微镜拍摄的实芯保偏光子晶体光纤截面如图 7 所示,其损耗约为 2 dB/km^[5],针对该光纤进行了散射的测量。测试过程中光纤方位角 ϕ 共旋转了 180°,每隔 5°进行一次散射光随 θ 角分布的测量,每次测多组求平均值。其中某个方位角 ϕ 下的散射角分布图如图 8 所示,横坐标为散射角 θ ,纵坐标为相干检测解算出来的电压值,与光纤散射对应。

将空间内所有位置的测试结果综合起来即可得到光纤的散射功率球,如图 9 所示,不同颜色代表散射光的强弱,反映了光纤散射强度在空间内的分布规律。可以看出,靠近光纤入射光的方向散射光最弱,靠近光纤出射光的方向散射光较强,这与在第 2 节中讨论的仿真结果相符。图 10 为散射率角分布

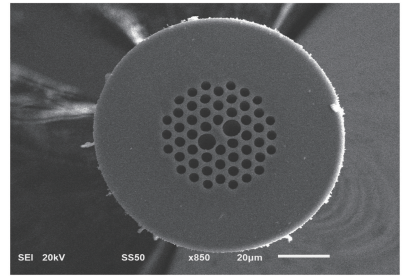


图 7 实芯 PM-PCF 截面图

Fig. 7 Sectional view of solid core PM-PCF

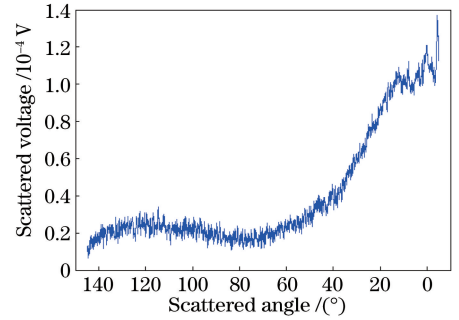


图 8 实芯 PM-PCF 散射角分布

Fig. 8 Scattering distribution of solid core PM-PCF

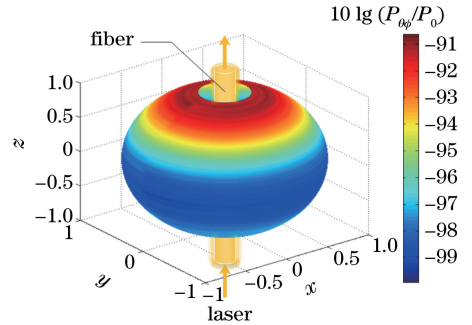


图 9 实芯 PM-PCF 散射功率球

Fig. 9 Scattering power ball of solid core PM-PCF

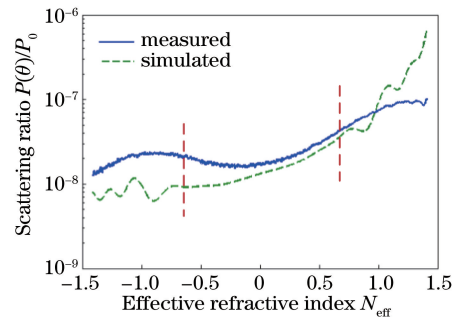


图 10 散射角分布实验结果与仿真结果对比

Fig. 10 Measured scattering distribution compared with simulation

$P_{\theta\phi}(\theta)/P_0$ 实验与仿真结果的对比,不难看出,二者的趋势基本一致,并且二者仅相差约 1.3 倍,说明实验结果与仿真结果基本吻合。

计算散射损耗所需的各测量参数值如表 1 所示。

表 1 测量参数值

Table 1 Measurement parameters

Parameter	$\Delta\phi /$ ($^{\circ}$)	$\Delta\phi_{\text{detector}} /$ rad	$\omega /$ [$(^{\circ}) \cdot \text{s}^{-1}$]	$\Delta T_{\text{sampling}} /$ Hz
Value	5	0.0285	1.04	100

将上述参数与实验数据代入(2)式,所计算出来的光纤损耗为 (0.23 ± 0.000625) dB/km,90%置信区间为 $[0.229, 0.231]$ 。实验结果与仿真结果仅相差 0.05 dB/km。考虑到待测光纤总传输损耗为 2 dB/km,散射损耗仅占很小的一部分,说明实际中实芯保偏光子晶体光纤损耗的主要原因并不是散射损耗。调研得知,实芯单模光子晶体光纤损耗约为 0.3 dB/km左右,与散射损耗理论值相近,说明在实芯保偏光子晶体光纤应用过程中还受到其他因素的影响:1) 采用毛细管堆积方式制作预制棒,相较改良化学气相沉积法,引入更多的杂质污染,会存在一定的杂质吸收;2) 二重对称的纤芯结构导致模场变形,在长距离传输中由于光纤扭转、弯曲等因素,致使非圆对称的模式耦合损耗加大。具体原因还需后续进一步研究。

5 结 论

从实验与仿真两方面出发,充分研究了实芯保偏光子晶体光纤的散射特性,搭建了空间散射分布的装置,测量灵敏度可达 1 pW,散射角测量范围可达 $15^{\circ} \sim 165^{\circ}$,光纤旋转角度分辨率可达 1° ,实现了三维散射球的测量,得到光纤散射损耗仅为 0.23 dB/km,与基于偶极子模型计算得到的理论仿真结果 0.179 dB/km 基本一致。研究结果为此类光纤损耗的定位与减小奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] Yang Y H, Yang F L, Lu L, *et al.* Research on interferometer photonic crystal fiber optic gyroscope technology[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328004.
杨远洪, 杨福铃, 陆林, 等. 干涉型光子晶体光纤陀螺技术研究[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328004.
- [2] Tian Y P, Yang X J, Guo Y Z, *et al.* Filtering analysis on the random noise of fiber optic gyroscope [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0906006.
田云鹏, 杨小军, 郭云曾, 等. 光纤陀螺随机噪声滤波分析[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0906006.
- [3] Li X Y, Liu P, Guang X X, *et al.* Temperature dependence of transverse magnetic error in a polarization maintaining fiber optic gyroscope [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0106006.
李绪友, 刘攀, 光星星, 等. 保偏光纤陀螺横向磁场误差的温度依赖性[J]. 光学学报, 2018, 38(1): 0106006.
- [4] Yin J L, Lu J, Liu J. Photonic crystal fiber and its applications in fiber optic gyroscope [J]. Sensor World, 2010, 16(5): 6-10.
殷建玲, 鲁军, 刘军. 光子晶体光纤及其在光纤陀螺中的应用[J]. 传感器世界, 2010, 16(5): 6-10.
- [5] Song N F, Cai W, Song J M, *et al.* Structure optimization of small-diameter polarization-maintaining photonic crystal fiber for mini coil of spaceborne miniature fiber-optic gyroscope [J]. Applied Optics, 2015, 54(33): 9831-9838.
- [6] Roberts P J, Couny F, Sabert H, *et al.* Loss in solid-core photonic crystal fibers due to interface roughness scattering[J]. Optics Express, 2005, 13(20): 7779-7793.
- [7] McCready M J. Spectral behavior of capillary waves in gas-liquid flows[J]. Physics of Fluids, 1986, 29(9): 2836-2842.
- [8] Unger H G. Planar optical waveguides and fibers [M]. New York: Clarendon, 1977.
- [9] Lines M E, Reed W A, di Giovanni D J, *et al.* Explanation of anomalous loss in high delta singlemode fibres[J]. Electronics Letters, 1999, 35(12): 1009.
- [10] Couny F, Sabert H, Roberts P J, *et al.* Visualizing the photonic band gap in hollow core photonic crystal fibers[J]. Optics Express, 2005, 13(2): 558-563.
- [11] NumkamFokoua E R, Poletti F, Richardson D. Dipole radiation model for surface roughness scattering in hollow-core fibers[C] // National Fiber Optic Engineers Conference, 2012.
- [12] Gao J Z. Weak signal detection [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
高晋占. 微弱信号检测[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.