

文章编号: 100123806(2007)05205402-04

掺铥光纤激光器研究进展

黎大军, 杜戈果*

(深圳大学 工程技术学院, 深圳 518060)

摘要: 介绍了掺铥光纤激光器的基本结构以及工作原理; 综述和分析了掺铥光纤激光器的研究国内外进展, 阐述了掺铥光纤激光器可以采用几种不同的抽运源进行抽运, 即 LD 抽运源、Nd:YAG 激光器抽运源、掺 Yb³⁺ 光纤激光器抽运源以及色心、掺钕光纤激光器抽运源等。同时也指出了如何提高激光器输出特性的方法, 即进一步改善交叉弛豫率、降低上转换以及热处理等。最后展望了掺铥光纤激光器在生物医学领域的应用前景。

关键词: 激光器; 掺铥光纤; 抽运源; 激光技术

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

The recent research progress of Tm³⁺ 2doped fiber lasers

LI Da Jun, DU Ge Guo

(School of Engineering and Technology Shenzhen University Shenzhen 518060, China)

Abstract The basic configuration and principle of Tm³⁺ 2doped fiber laser were introduced. The latest research progresses of Tm³⁺ 2doped fiber lasers pumped by various pump sources, such as LD, Nd:YAG laser, Yb³⁺ 2doped fiber lasers and Er³⁺ 2doped fiber lasers, were reviewed and analysed in detail. Output characteristics of lasers could be improved through improving cross relaxation rate, minimizing energy transfer upconversion and addressing thermal management issues. Some potential applications in the biomedical field was also presented.

Key words lasers; Tm³⁺ 2doped fiber; pump sources; laser technique

引 言

稀土元素是掺杂光纤激光器的核心, 同时也决定着对光抽运的吸收和激光光谱。近年来, 掺稀土离子 (Nd³⁺, Yb³⁺, Er³⁺, Tm³⁺ 等) 光纤激光器得到了快速的发展, 而掺铥光纤激光器是其中一朵灿烂的鲜花。随着上世纪 90 年代中期包层抽运光纤激光器技术和大功率半导体激光器作为抽运源技术的发展以来, 在抽运源和激活介质的选择以及激光器输出功率方面都获得了极大的发展, 从单包层掺铥光纤激光器连续波输出毫瓦量级发展到双包层掺铥光纤激光器, 输出达百瓦, 而且在效率、光束质量、常温工作等方面得到了很好的进步。最近德国 IPG 光子公司网站上报道, 利用光纤溶锥抽运技术和光纤光栅谐振腔技术, 采用输出 980nm 半导体激光阵列作为抽运源, 实现了掺铥双包层光纤激光器输出功率高达 150W 的单模连续波输出, 并已经产品化。目前对掺铥光纤激光器的研究已

经到调 Q、锁模、飞秒输出阶段, 而且理论研究也逐步完善起来^[1, 2]。

1 基本结构和工作原理

光纤激光器主要由 3 部分组成: 由能产生光子的增益介质、使光子得到反馈并在增益介质中进行谐振放大的光学谐振腔和可使激光介质处于受激状态的抽运源装置。光纤激光器的基本结构如图 1 所示。增益

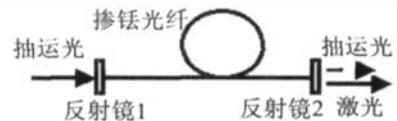


图 1 光纤激光器的基本结构

介质为掺有稀土离子的光纤芯, 掺杂光纤放置在两个反射率经过选择的腔镜之间, 抽运光从光纤激光器的左边腔镜耦合进入光纤; 谐振腔是两个二色镜构成的, 可以直接在光纤端面上镀膜, 也可以采用定向耦合器或者光纤光栅等方式构成谐振腔, 以形成激光振荡。

当抽运光通过光纤中的稀土离子时, 就会被稀土离子所吸收, 吸收光子能量的稀土离子就会被激励到较高激发能级, 从而实现离子数反转。反转后的离子数就会以辐射形式从高能级转移到基态, 并且释放出能量, 完成受激辐射。

作者简介: 黎大军 (1972), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器方面的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: dugeguo@szu.cn

收稿日期: 2006208230; 收到修改稿日期: 2006209227

2 掺铥光纤激光器的研究进展

铥离子 (Tm^{3+}) 的能级结构非常丰富, 如图 2 所示。石英光纤中铥离子 Tm^{3+} 的吸收和发射谱^[3] 如图 3 所示。因而在铥离子几个吸收波段, 可以采用不同

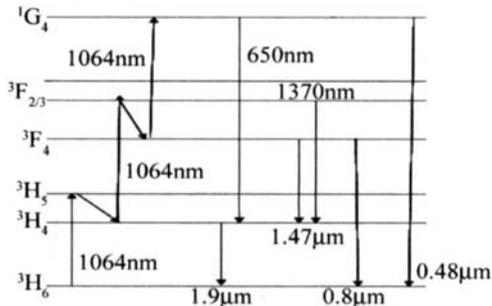


图 2 Tm^{3+} 的能级结构

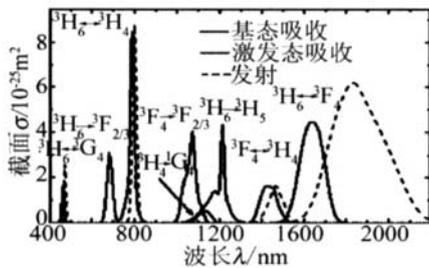


图 3 石英光纤中 Tm^{3+} 的吸收谱和发射谱

的光源抽运掺铥光纤激光器, 这些光源主要包括: 780nm~1.0μm LD 抽运 Tm^{3+} 的 $^3\text{F}_4$ 能级, 1.064μm 和 1.319μm Nd:BYAG 激光器和掺 Yb^{3+} 光纤激光器 (1.0μm~1.1μm) 抽运 Tm^{3+} 的 $^3\text{H}_5$ 能级, 1.57μm 掺钕光纤激光器与 1.64μm 的色心激光器抽运 Tm^{3+} 的 $^3\text{H}_4$ 能级, 如图 4 所示。下面就抽运源波长的不同, 综述掺铥光纤激光器研究进展。

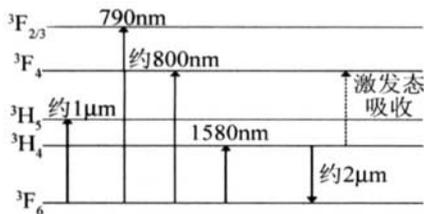


图 4 Tm^{3+} 的抽运结构

2.1 780nm~1.0μm LD 抽运源

从图 3 中可以看到, Tm^{3+} 在 800nm 附近有较强的吸收, 因此可用激光二极管来抽运, 从而实现全固化。1998 年, JACKSON 和 KING 两人首次报道了用高功率、输出波长为 790nm 二极管激光阵列作为抽运源, 获得了波长为 2μm 连续波输出功率为 5W 的激光, 斜率效率高达 31%^[4]。2000 年, 英国南安普敦大学 HAYWARD 等人报道了用激光二极管 (787nm) 抽运掺铥双包层硅光纤, 实现了 2μm 单模连续运转, 得到了当时最高 14W 输出功率^[5]。2002 年, CLARKSON

等人报道了用两个光束成形和偏振耦合宽条激光二极管 (787nm) 抽运掺铥硅光纤, 实现了 1940nm 激光输出, 输出功率 7W (针对 40W 入射功率), 同时采用一个衍射光栅形成外腔实现了调谐 1860nm~2090nm (230nm)^[6]。2004 年, DONG 等人报道了国内在 Tm , Ho 共掺石英光纤激光器方面的最新结果。采用中心波长为 796nm 最大功率可达 2W 的圆对称单模激光去抽运 Tm , Ho 共掺石英单模光纤, 当光纤长度为 52cm 时, 在 1.4W 的激光抽运下, 获得了功率为 240mW、波长为 1870nm 的高性能单模激光输出, 激光抽运阈值为 370mW, 输出斜率效率为 30.8%, 这是国内目前使用该类光纤所获得最高转换效率^[7]。同年该研究组首次报道了用同样的抽运源和 Tm , Ho 共掺石英光纤等构成复合腔, 通过外腔选频产生波长为 820nm 波段高性能单模激光的实验研究, 而该复合腔集 Ti:Bapphire 激光调谐及光纤激光的优越性能, 弥补了 0.75μm~1.1μm 波段尚无相应的光纤激光器的不足^[8]。英国南安普敦大学 JEONG 等人于 2005 年用 LD (975nm) 抽运双包层掺铥铈光纤 (YTDF), 得到输出功率为 75W、斜率效率为 32% 的激光 (2.04μm)。当抽运功率过高时, 会引起光纤的损害, 为了解决热处理问题, 可以通过用非高峰抽运波长 (如 915nm 或 940nm) 来降低掺杂浓度或者减少活性纤芯与抽运纤芯的比率。如果这个问题能够解决, 那么得到更高功率的激光输出成为可能^[9]。澳大利亚 FRITH 等人于 2005 年报道了用 793nm 激光二极管作为抽运源, 去抽运掺 Tm^{3+} 原子分数为 0.022 氟硅酸盐光纤, 实现了中心波长为 2.04μm (线宽 20nm) 连续运转, 在入纤功率 160W 时得到了 85W 的输出, 这是目前用该类 LD 抽运所得到最高的功率。如果交叉弛豫过程进一步得到改善, 减少能量上转换, 同时能够解决热处理问题, 那么在未来掺铥硅光纤激光器的输出功率可能达到千瓦级的水平。而提高铥离子的浓度和降低能量上转换所带来的损害, 这对交叉弛豫过程和斜率效率最大化都是非常重要的^[10]。

2.2 Nd:BYAG 激光器抽运源

在掺 Tm^{3+} 石英玻璃中, Tm^{3+} 的吸收波段中心在 1.2μm 左右, 因此可以采用 1.06μm 的 Nd:BYAG 激光器作为抽运源。尽管 Tm^{3+} 在玻璃基质中对 1.06μm 的吸收比较弱以及对抽运波长存在激发态吸收, 但 Nd:BYAG 激光器来抽运掺 Tm^{3+} 硅基光纤激光器仍是一种可行的抽运源。英国南安普敦大学 HANNA 等人于 1989 年报道了用 1.064μm Nd:BYAG 激光器抽运掺 Tm^{3+} 硅基光纤, 实现了 51mW 输出^[11]。日本 MUYA 等人于 1993 年报道了采用一个上转换系统, 利

用 1.064 μm Nd:YAG 去抽运掺 Tm^{3+} 氟化物光纤, 得到 1W CW 1.47 μm 激光输出, 并通过旋转镀有多层介质膜的窄带滤光片, 实现了 1.45 μm ~ 1.51 μm 的调谐^[12]。1994 年, 英国 PERCIVAL 等人报道了用 1.064 μm Nd:YAG 激光器抽运氟化物光纤, 在 1.47 μm 得到了激光输出^[13]。1998 年, JACKSON 和 KING 两人报道首次采用低重复频率高能量脉冲 Nd:YAG 激光器抽运 Tm^{3+} 的 $^3\text{H}_5$ 能级, 得到了最大脉冲能量 1.46mJ, 最大斜率效率 20%, 光光转换效率 19%。在低抽运能量下, 得到了斜率效率 40%, 因此, 随着抽运能量逐渐升高, 抽运激发态吸收所带来的损耗限制了光纤激光器的输出能量^[14]。2003 年, 瑞士 EDAGMY 等人报道了采用 1.064 μm Nd:YAG 激光器作为抽运源, 去抽运掺 Tm^{3+} 氟化物光纤, 在 1.47 μm 得到连续波输出, 输出功率 1.56W, 斜率效率 33%^[15]。2005 年, ZHANG 等人首次报道了用 1.064 μm Nd:YAG 激光器抽运增益开关掺铥双包层硅光纤激光器的最新结果。对 3 种不同光纤长度进行研究, 输出峰值波长分别为 2.04 μm , 2.0 μm , 1.92 μm , 实现输出脉冲能量 14.7mJ, 斜率效率 39.9% (针对抽运能量), 这是采用 1.064 μm 抽运情况下得到的最高效率。采用重掺铥大芯径光纤来提高吸收率和优化光纤长度, 都会进一步提高光纤激光器的输出能量和斜率效率^[16]。

与 1.064 μm Nd:YAG 激光器一样, 1.319 μm 的 Nd:YAG 激光器抽运掺铥光纤, 也是一种可利用的高功率抽运源。尽管在这个抽运波长有相对小的吸收截面, 但是来自这种特殊抽运源的量子缺陷和高抽运功率也说明了光纤激光器产生不饱和输出。正是抽运能级与 Tm^{3+} 的 $^3\text{H}_4$, $^3\text{F}_4$ 能级之间差异的巧合, 产生了不必要的抽运激发态吸收过程, 但是这种过程不会影响光纤激光器的主要性能。2000 年, 英国曼彻斯特大学 GOLDING 等人利用 1.319 μm 的 Nd:YAG 激光器抽运 Tm^{3+} 的 $^3\text{H}_5$ 能级, 得到了最大输出功率为 310mW, 斜率效率为 23%, 输出中心波长为 2020 μm 的激光; 同时通过调 Q 得到了 16W/280ns 重复频率达到 20kHz 的脉冲^[17]。2002 年, 英国曼彻斯特大学 ELSHERIF 等人报道了首次从实验和理论上, 在不同光抽运结构下, 高功率端面抽运掺铥单包层光纤激光器。实验采用 1.319 μm Nd:YAG 激光器 (线形双向谐振腔) 作为抽运源, 得到了 2 μm 自脉冲激光输出^[18]。2003 年, 该研究小组报道了采用 1.319 μm Nd:YAG 激光器抽运掺铥硅光纤 (芯径 17 μm), 通过声光调制得到当时最新结果: 重复频率达 30kHz 峰值输出功率 4kW, 持续时间 150ns 的脉冲^[19]。同年, 该研究组首次又通过电光调制得到了 Q 开关 2 μm 掺铥硅光纤激光器。采用大

面积多模光纤 (纤芯 17 μm) 获得了高增益和高脉冲能量, 峰值功率 3.3kW, 低重复频率 70Hz 脉冲能量 2.3mJ^[20]。使用这种电光调制不失为一种提高单模输出功率和能量的重要方法。

2.3 掺 Yb^{3+} 光纤激光器抽运源

对抽运掺铥硅基光纤一个潜在的吸引力就是工作在约 1.02 μm 到约 1.1 μm 掺铥硅光纤激光器, 这种掺铥硅光纤激光器能够抽运铥 $^3\text{H}_5$ 能级, 图 5 是掺铥硅

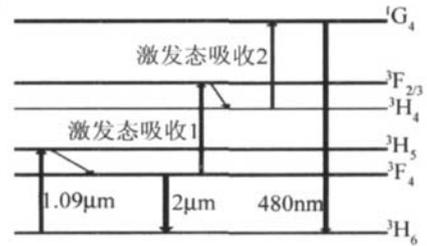


图 5 1.09 μm 抽运能级跃迁图

光纤在 1.09 μm 作为抽运源下的能级跃迁图^[21]。与波长 1.06 μm 一样, Tm^{3+} 对 1.09 μm 的吸收也比较弱以及对抽运波长也存在激发态吸收, 但用 1.09 μm 掺 Yb^{3+} 光纤激光器作为抽运源来抽运掺 Tm^{3+} 硅基光纤激光器也是可行的。同时也由于掺铥光纤激光器具有效率高、光束质量好、输出功率高等特点, 可用它来作为其它光纤激光器抽运源受到人们的关注。因此, 高效的、紧凑的光纤激光器抽运光纤激光器系统成为可能。

2004 年, 英国曼彻斯特大学 TSANG 等人报道了采用 1.09 μm 的波长转换掺铥硅光纤激光器作为抽运源, 去抽运掺铥硅光纤激光器, 得到 1.9 μm 的激光输出。斜率效率高达 27% (针对吸收抽运功率), 最大阈值功率 50mW, 最大输出功率 1.1W, 光光转换效率 10%。并且通过使用不同的反射输出耦合, 实现了 1930nm ~ 2060nm 范围内的调谐。由于激发态吸收导致输出功率饱和, 这就意味着 1.09 μm 抽运的掺铥光纤激光器的输出功率有可能还会得到提高^[21]。

2.4 色心/掺铟光纤激光器抽运源

从图 4 中看到, 也可以采用 1580nm 的激光去抽运 Tm^{3+} 的能级 $^3\text{H}_4$ 。日本 YAMAMOTO 等人于 1994 年报道了用掺铟光纤激光器 (1.57 μm) 去抽运掺 Tm^{3+} 硅光纤, 在 1.9 μm 处得到最大输出功率 21mW (针对入纤功率 127mW), 阈值抽运功率 95mW, 斜率效率 71% 的激光, 通过调节光纤长度实现波长调谐 1.84 μm ~ 1.90 μm ^[22]。2003 年, 英国南安普敦大学 SAHU 等人用掺 Er^{3+} Yb^{3+} 光纤激光器 (1567nm) 抽运掺 Tm^{3+} 硅光纤, 实现了 1830nm 连续运转, 同时使用一个外光栅实现连续调谐 1750nm ~ 1880nm。日本 YAMAMOTO 等人于 1993 年报道了采用 NaCl 色心可

调激光器 (1.50Lm ~ 1.65Lm) 作为抽运源, 抽运掺 Tm^{3+} 氟化物光纤, 激光器输出功率 51mW, 斜率效率 70%, 放大器小信号增益达到 18dB^[23]。1995年, PER2 CVAL 等人报道了采用色心激光器 (1640nm) 抽运掺铥氟化物光纤, 实现 1.9Lm 激光输出, 最小阈值 340LW, 最大斜率效率 84%, 放大器小信号增益系数 81dB/mW, 在发射抽运功率 17mW ~ 18mW 时, 最大增益达 36.5dB^[24]。

3 掺铥光纤激光器的应用

2Lm 波段的掺铥光纤激光器在医学、光通讯、超快光学、遥感技术和雷达等方面显示出重要的应用前景, 尤其是 2Lm 波段的掺铥光纤激光器越来越广泛地应用到生物医学领域。目前应用在外科手术临床的激光器主要有: CO_2 激光器、Er:YAG 激光器、Nd:YAG 激光器、Ho:YAG 激光器、Tm:YAG 激光器。而 Tm 激光将 CO_2 激光现有特性与 Nd:YAG 激光器的止血效果, 以及 Ho:YAG 激光器损伤组织小的特性集于一身, 在生物组织切除和疼痛神经刺激方面有着非常广泛地应用前景, 因此, 在未来 10 多年内, 2Lm 掺铥光纤激光器将成为激光外科手术领域中最重要突破^[25]。未来 2Lm 波段的激光也将成为 2.5Lm ~ 12Lm 范围内激光器的有效抽运源而引起人们的广泛关注。

4 结束语

首先介绍了掺铥光纤激光器的基本结构以及工作原理。结合铥离子几个不同的吸收波段, 采用不同的抽运方式, 详细地综述和分析了掺铥光纤激光器在输出功率和斜率效率、抽运源和激活介质的选择、调 Q 以及波长调谐等方面的研究国内外进展, 同时讨论了如何进一步改善交叉弛豫、减少能量上转换以及热处理等问题, 可使掺铥光纤激光器提高输出功率和斜率效率。最后介绍了掺铥光纤激光器在生物医学切除和疼痛神经刺激领域的应用前景。

参 考 文 献

- [1] JACKSON S D, KING T A. Theoretical modelling of Tm²doped silica fiber laser [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology 1999, 17(5): 948~ 956.
- [2] DONG Sh F, CHEN G F, ZHAO Sh H et al Theoretical study on the 1180nm laser pumped Tm, Ho co doped silica fiber laser [J]. Laser Technology 2006, 30(2): 138~ 141(in Chinese).
- [3] PETERKA P, FAURQ B, BLANC W et al Theoretical modelling of S2 band thulium doped silica fiber amplifiers [J]. Optical and Quantum Electronics 2004, 36(1~3): 201~ 212.
- [4] JACKSON S D, KING T A. High power diode cladding pumped Tm doped silica fiber laser [J]. Opt Lett 1998, 23(18): 1462~ 1464.
- [5] HAYWARD R A, CLARKSON W A, TURNER P W et al Efficiency cladding pumped Tm doped silica fibre laser with high power single mode output at 2Lm [J]. Electron Lett 2000, 36(8): 711~ 712.
- [6] CLARKSON W A, BARMES N P, TURNER P W et al High power cladding pumped Tm doped silica fiber laser with wavelength tuning from 1860 to 2090nm [J]. Opt Lett 2002, 27(22): 1989~ 1991.
- [7] DONG Sh F, CHEN G F, WANG X H et al Experimental researches on Tm³⁺ Ho³⁺ Co doped silica fiber lasers [J]. Acta Photonica Sinica 2004, 33(2): 129~ 132(in Chinese).
- [8] DONG Sh F, CHEN G F, WANG X H et al Researches on Tm laser to producing 820nm band laser beam by frequency selecting with external cavity [J]. Acta Photonica Sinica 2004, 33(4): 393~ 395(in Chinese).
- [9] JEONG Y, DUPREZ P, SAHU J K et al Power scaling of 2Lm ytterbium sensitised thulium doped silica fibre laser diode pumped at 975nm [J]. Electron Lett 2005, 41(4): 173~ 174.
- [10] FRITH G, LANCASTER D G, JACKSON S D. 85W Tm³⁺ doped silica fibre laser [J]. Electron Lett 2005, 41(12): 687~ 688.
- [11] HANNA D C, McCARTHY M J, PERRY I R et al Efficient high power continuous wave operation of monomode Tm doped fibre laser at 2Lm pumped by Nd:YAG at 1.064Lm [J]. Electron Lett 1989, 25(20): 1365~ 1366.
- [12] MIYAJIMA Y, KOMUKAI T, SUGAWA T. 1W CW Tm doped fluoride fiber laser at 1.47Lm [J]. Electron Lett 1993, 29(8): 660~ 661.
- [13] PERCIVAL R M, SZEBESTA D, WILLIAMS J R. Highly efficient 1.064Lm upconversion pumped 1.47Lm thulium doped fluoride fiber laser [J]. Electron Lett 1994, 30(13): 1057~ 1058.
- [14] JACKSON S D, KING T A. Efficient gain switched operation of a Tm doped silica fiber laser [J]. Quantum Electronics 1998, 34(5): 779~ 789.
- [15] ELZAGMY R M, LUTHY W, GPAF T H et al 1.47Lm Tm³⁺ BZB2 LAN fibre laser pumped at 1.064Lm [J]. Electron Lett 2003, 39(6): 507~ 508.
- [16] ZHANG Y J, YAO B Q, JU Y L et al Gain switched Tm³⁺ doped double clad silica fiber laser [J]. Optics Express 2005, 13(4): 1085~ 1089.
- [17] GOLDING P S, JACKSON S D, TSAI P K et al Efficient high power operation of a Tm doped silica fiber laser pumped at 1.319Lm [J]. Opt Commun 2000, 175: 179~ 183.
- [18] ELZHERIF A F, KING T A. Dynamics and self pulsing effect Tm³⁺ doped silica fibre laser [J]. Opt Commun 2002, 208: 381~ 389.
- [19] ELZHERIF A F, KING T A. Analysis and optimization of Q switched operation of a Tm doped silica fiber laser [J]. Quantum Electronics 2003, 39(6): 759~ 765.
- [20] ELZHERIF A F, KING T A. High energy high brightness Q switched Tm³⁺ doped fiber laser using an electrooptic modulator [J]. Opt Commun 2003, 218: 337~ 344.
- [21] TSANG Y H, COLEMAN D J, KING T A. High power 1.9Lm Tm³⁺ 2 silica fibre laser pumped at 1.09Lm by a Yb³⁺ 2 silica fibre laser [J]. Opt Commun 2004, 231: 357~ 364.
- [22] YAMAMOTO T, MIYAJIMA Y, KOMUKAI T. 1.9Lm Tm doped silica fiber laser pumped at 1.57Lm [J]. Electron Lett 1994, 30(3): 220~ 221.
- [23] YAMAMOTO T, MIYAJIMA Y, KOMUKAI T et al 1.9Lm Tm doped fluoride fibre amplifier and laser pumped at 1.58Lm [J]. Electron Lett 1993, 29(11): 986~ 987.
- [24] PERCIVAL R M, SZEBESTA D, SELTZER C P et al A 1.6Lm pumped 1.9Lm thulium doped fluoride fiber laser and amplifier of very high efficiency [J]. Quantum Electronics 1995, 31(3): 489~ 493.
- [25] YANG K, REN Q, SWEIS G et al Application of 2Lm Tm laser on biomedicine [J]. Laser & Optoelectronics Progress 2005, 42(9): 52~ 56(in Chinese).