

# 混合抽运和增益开关铥/钬共掺脉冲光纤 激光器对比研究

王 雄 周 朴\* 王小林 肖 虎 司 磊 刘泽金

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 提出了利用 1570 nm 的连续激光和 1565 nm 的脉冲激光混合抽运铥/钬共掺光纤获得脉冲激光输出的方案, 搭建相应的实验平台, 得到了混合抽运方式下的 2  $\mu\text{m}$  稳定脉冲激光输出。同时进行了直接增益开关方式获得脉冲输出的实验。对两种方式获得的脉冲进行了对比。实验结果表明, 在相同输出功率水平下, 混合抽运方式获得的脉冲激光更加稳定, 能量浮动小于 5%。相对于直接增益开关方式, 混合抽运方式在获得更加稳定的脉冲激光输出上具有一定优势。但直接增益开关方式获得的激光输出的脉宽要小于混合抽运方式获得的激光脉宽。

**关键词** 激光器; 混合抽运; 增益开关; 铥/钬共掺光纤激光器

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0302010

## Contrastive Research on Hybrid-Pump Pulse and Gain-Switch Pulse Tm-Ho Co-Doped Fiber Lasers

Wang Xiong Zhou Pu Wang Xiaolin Xiao Hu Si Lei Liu Zejin

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

**Abstract** The concept of hybrid-pumped Tm-Ho co-doped pulse fiber laser by pumping the laser with a 1570 nm continuous-wave laser and a 1565 nm pulse laser is demonstrated. The experimental setup is built up and stable pulse train of 2  $\mu\text{m}$  is obtained. Directly gain-switched pulse train of Tm-Ho co-doped fiber laser is generated to compare the two methods of generating pulse laser. The results show that the hybrid-pumped pulse train is more stable than the gain-switched pulse train at the same laser output power level, and the energy fluctuation of the hybrid-pumped pulse train is less than 5%. Hence, the hybrid-pumped method is a more effective approach to generate stable pulse train. It should be noted that the pulse width of gain-switched pulse is narrower than that of the hybrid-pumped pulse.

**Key words** laser; hybrid-pumping; gain-switching; Tm-Ho co-doped fiber laser

**OCIS codes** 140.3538; 060.2390; 060.3510; 140.3510

## 1 引 言

掺铥光纤激光器在生物医学、光谱测量、遥感测量、激光雷达(LIDAR)等领域有巨大的应用前景, 近年来受到国内外研究人员的广泛关注<sup>[1-12]</sup>。在许多应用中, 例如光学参量放大(OPO)获得中红外激光光源和 LIDAR, 都需要掺铥脉冲激光<sup>[2,13]</sup>。增益开关是获得脉冲激光输出的一种有效途径<sup>[14-16]</sup>, 1998 年, Jackson 等<sup>[1]</sup>报道了基于增益开关方式的掺铥激光器, 单脉冲能量可达到 1.46 mJ; 2002 年,

Jackson 等<sup>[17]</sup>分析了增益开关铥/钬脉冲激光器中产生的序列脉冲; 2007 年, Jiang 等<sup>[3]</sup>报道了脉宽为 10 ns、峰值功率为千瓦级的增益开关掺铥脉冲激光输出; 2010 年, Tang 等<sup>[9]</sup>实现了单脉冲能量为 10 mJ、峰值功率为 138 kW 的增益开关掺铥脉冲激光输出; 2011 年, Li 等<sup>[8]</sup>研究了 Q 开关和增益开关在级联激光器中的相互作用。然而, 增益开关获得脉冲的过程中可能产生次级脉冲, 脉冲的能量稳定性有待提高, 而且脉冲输出中的噪声限制了其在实

收稿日期: 2013-09-02; 收到修改稿日期: 2013-11-01

作者简介: 王 雄(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率光纤激光器方面的研究。

E-mail: wangxiongndt@163.com

导师简介: 刘泽金(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: zelinliu@vip.sina.com

\* 通信联系人。E-mail: zhoup203@163.com

际中的应用<sup>[17-18]</sup>。Yang 等<sup>[19]</sup>提出了混合抽运方式获得脉冲激光的方案,先使用 790 nm 的半导体抽运源将掺铋光纤激光器抽运到出光阈值附近,积累大量的上能级粒子数;然后用 1053 nm 的脉冲激光抽运掺铋激光器,使得只有在脉冲抽运时激光腔内的增益大于阈值,从而获得相对于直接增益开关方式具有更高的信噪比和稳定性的 2 μm 脉冲激光输出。由于掺铋光纤在 1053 nm 波长的吸收系数较低,他们通过提高 1053 nm 脉冲激光器的输出功率以获得高能量的 2 μm 脉冲输出,但仍然有较多残余的1053 nm脉冲激光。混合抽运和增益开关两种方案的优劣有待实验研究。

在本文的实验中,搭建了铋/钬共掺混合抽运脉冲光纤激光器系统,利用 1570 nm 的连续激光将激光腔中的增益提高至出光阈值附近,然后用 1565 nm 的脉冲激光抽运铋/钬共掺激光器,获得了稳定的 2 μm 脉冲光纤激光输出。并在此系统的基础上对混合抽运方式和增益开关方式获得的脉冲输出进行了对比研究。

## 2 实验结构

混合抽运脉冲光纤激光器的实验结构如图 1 所示。抽运激光为 1570 nm 的连续光纤激光器和 1565 nm 的脉冲光纤激光器,两个抽运激光器通过耦合器注入到铋/钬共掺光纤(T-HDF)激光谐振腔中。掺杂光纤是长度为 4 m、纤芯直径为 9 μm、包层直径为 125 μm 的单包层 T-HDF。谐振腔的两端是中心波长约为 1952 nm、反射率分别为 99% 的高反(HR)光纤布拉格光栅(FBG)和 30% 的耦合输出(OC)光纤布拉格光栅,反射带宽分别为 1 nm 和 0.5 nm。

混合抽运实验中,使用中心波长为 1570 nm 的连续激光器作为抽运激光,将 T-HDF 激光器抽运至出光阈值附近;然后利用中心波长为 1565 nm 的

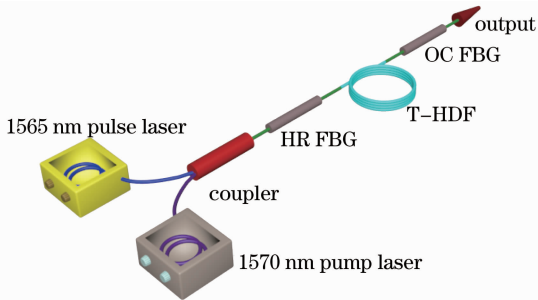


图 1 混合抽运脉冲光纤激光器实验结构图  
Fig. 1 Schematic diagram of hybrid-pumped pulse fiber laser

脉冲激光器抽运 T-HDF 激光器,可以获得稳定的脉冲输出。在增益开关方式的对比实验中,将图 1 中的 1570 nm 抽运激光器和耦合器移除,直接利用 1565 nm 的脉冲激光器进行增益开关抽运,并对激光输出进行分析。实验采用高速光电探测器(带宽为 10 GHz)和数字示波器(带宽为 1.5 GHz)对脉冲输出的波形进行测量,利用分辨率为 0.05 nm 的光谱分析仪测量输出激光的光谱。

## 3 实验结果及分析

混合抽运实验中,1570 nm 的抽运激光器的输出功率保持在 105 mW,已经接近但小于 T-HDF 激光器出光阈值,此时激光器尚未出光。若再增加几毫瓦的连续抽运光,则掺铋激光器振荡出光。因此将 1570 nm 的抽运光功率固定在 105 mW,通过增加 1565 nm 的脉冲抽运光功率使激光器振荡。1565 nm 的脉冲激光器的脉宽可以在 15~86 ns 之间调整,脉冲重复频率在 1~100 kHz 可调。在不同的脉冲宽度和重复频率下,1565 nm 脉冲激光输出的平均功率不同,因而 T-HDF 激光的输出功率也会不同。图 2 中为 T-HDF 激光器在不同脉冲宽度时,输出功率与 1565 nm 激光器抽运功率的关系曲线,脉冲重复频率为 7 kHz。从图中可以发现若 1565 nm 激光脉冲宽度增大,则 T-HDF 激光的输出功率会提高,另外,抽运脉冲宽度减小,混合抽运方案中激光器出光需要的 1565 nm 抽运功率将增加。

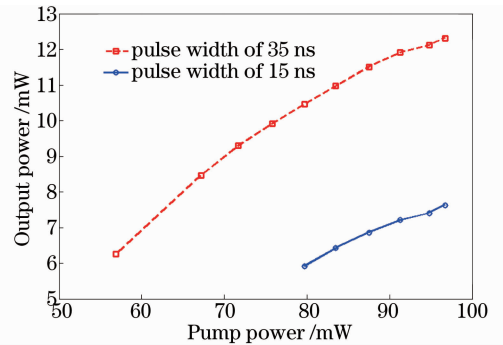


图 2 不同脉冲宽度情况下的 T-HDF 激光器输出功率曲线

Fig. 2 Output power of the T-HDF laser with different pulse widths

图 3 为 T-HDF 激光器在混合抽运情况下的输出光谱,插图为中心波长光谱,可以看出激光的中心波长位于 1952.5 nm。由于 T-HDF 在 1550 nm 波段的吸收系数相对 1053 nm 更高,1565 nm 和 1570 nm 的抽运激光几乎完全被吸收,激光器工作

在单一波长状态。

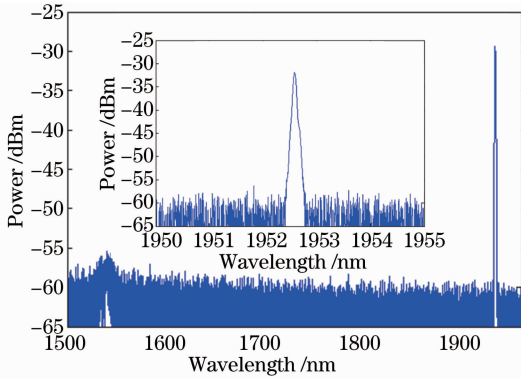


图 3 混合抽运脉冲激光器光谱

Fig. 3 Spectrum of hybrid-pumped pulse laser

为了分析混合抽运方式和增益开关方式获得的脉冲激光的优劣,在保证了两种方式获得的  $2\ \mu\text{m}$  激光脉冲平均功率相等的情况下(均为  $7.5\ \text{mW}$ ),进行了对比实验。实验中,  $1565\ \text{nm}$  抽运激光的脉冲宽度设定为  $15\ \text{ns}$ ,重复频率在  $1\sim 10\ \text{kHz}$  之间变化。实验获得的脉冲波形对比如图 4 所示。

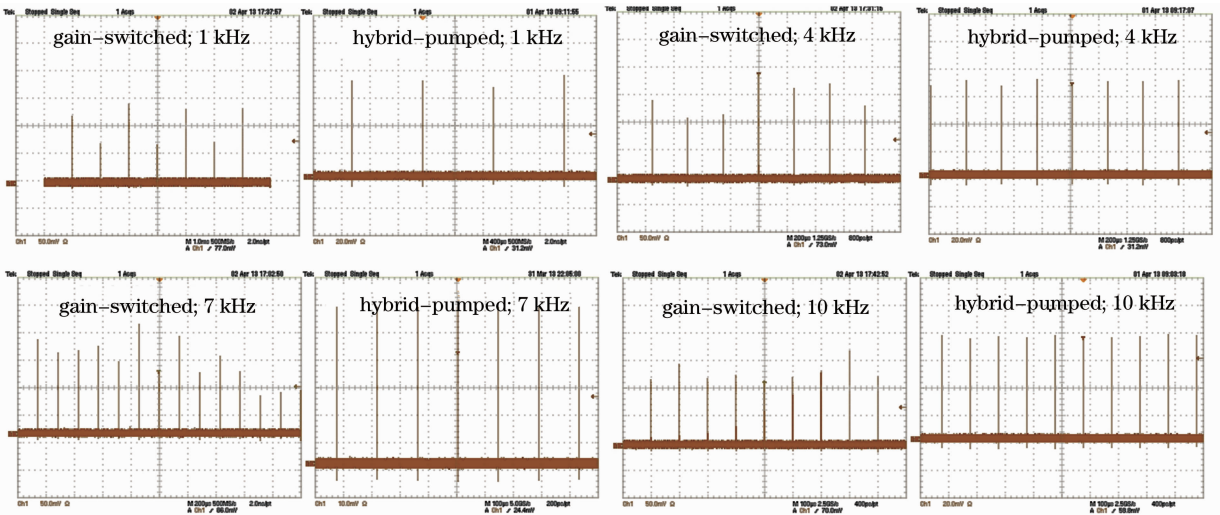


图 4 增益开关获得脉冲和混合抽运获得脉冲激光输出波形对比

Fig. 4 Comparison of the pulse laser trains obtained by gain-switched and hybrid-pumped methods

实验中对脉冲激光的脉宽进行了对比分析,如图 5 所示。由于实验室现有的  $1565\ \text{nm}$  脉冲激光器性能有限,脉冲波形存在比较明显的畸变,当设定脉冲宽度为  $15\ \text{ns}$  时,测得的实际有效脉冲宽度为  $2.52\ \text{ns}$ ,不过这并不影响实验中的对比分析结果。通过对比图 5 中的脉冲可以发现,相对于  $1565\ \text{nm}$  的抽运脉冲宽度,增益开关方式获得的脉冲宽度得到了一定的压缩,而混合抽运方式获得的脉冲有一定展宽。一个可能的原因是激光腔的出光阈值不同造成脉冲宽度不同。假设抽运脉冲为高斯形状的脉

从图 4 中可以看出,当脉冲重复频率为  $7\ \text{kHz}$  时,直接增益开关方式获得的脉冲能量浮动最大,会超过  $50\%$ ,而混合抽运方式获得的脉冲能量浮动小于  $5\%$ 。可见在相同的功率水平下,混合抽运方式获得的脉冲输出的稳定性明显高于直接增益开关方式获得的脉冲。比较合理的解释是,在增益开关方式中,激光腔中增益比出光阈值低很多,每个抽运脉冲需要消耗较多的抽运能量将激光增益提高至出光阈值附近,然后主要由这个脉冲剩余的抽运能量来产生激光输出。由于激光腔中损耗来源的多样性(增益光纤的吸收系数、光纤的弯曲损耗、微弯损耗、波长漂移等),在每个激光脉冲出光前消耗的抽运能量可能有所不同,这样最终产生的脉冲输出能量将出现较大波动。而在混合抽运方式中,在脉冲抽运之前已经使用连续抽运光将激光腔的增益提高至出光阈值附近(但小于阈值),这样脉冲抽运光就可以有效缩短在阈值下提高腔内增益的过程,迅速使腔内增益超过阈值,产生稳定的脉冲激光输出。

冲。增益开关方式中的腔内增益超过出光阈值时,实际抽运脉宽要小于初始的抽运脉宽,因而产生的  $2\ \mu\text{m}$  激光脉宽将明显小于抽运脉宽。但混合抽运方式中,腔内增益超过出光阈值时的实际抽运脉宽与初始的抽运脉宽相差不大,产生的激光输出脉宽也与抽运脉宽相近,如图 6 所示。另外,在相同的输出功率水平下,混合抽运方式中抽运脉冲的单个脉冲能量要明显小于增益开关方式中的抽运脉冲能量。这种能量差异将有可能是造成两种方式获得的激光输出脉宽不一致的原因。

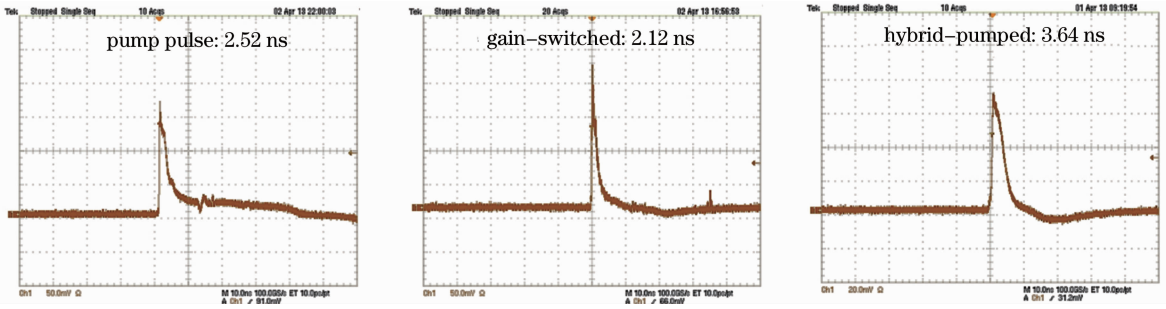


图 5 抽运脉冲、混合抽运获得脉冲和增益开关获得脉冲激光输出脉冲宽度对比  
Fig. 5 Comparison of the widths of pump pulse, hybrid-pumped pulse and gain-switched pulse

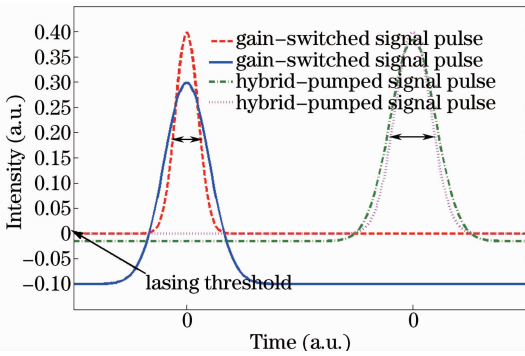


图 6 混合抽运方式和增益开关方式获得脉冲激光输出的脉冲宽度分析

Fig. 6 Analysis of the output pulse widths obtained by hybrid-pumped and gain-switched methods

## 4 结 论

利用混合抽运方式获得了高稳定性的  $2\ \mu\text{m}$  铥/钬共掺脉冲光纤激光输出,在同等输出功率条件下,该方式获得的峰值功率稳定性明显高于直接增益开关方式获得的脉冲输出。尽管混合抽运方式获得的脉冲的脉宽比直接增益开关方式的要宽,但混合抽运仍是一种有效的获得高稳定性脉冲激光输出的方案。受限于抽运功率,更高平均功率输出情况下的脉宽压缩情况没有验证,但可以预计当功率提升时,脉宽压缩性能将有可能明显提高。在下一步工作中,可提高抽运功率,改变抽运波长,进一步提升该方案获得的脉冲参数。

## 参 考 文 献

- 1 Jackson S D, King T A. Efficient gain-switched operation of a Tm-doped silica fiber laser[J]. IEEE J Quantum Electron, 1998, 34(5): 779-789.
- 2 Scholle K, Heumann E, Huber G. Single mode Tm and Tm, Ho:LuAG lasers for LIDAR applications[J]. Laser Phys Lett, 2004, 1(6): 285-290.
- 3 Jiang M, Tayebati P. Stable 10 ns, kilowatt peak-power pulse generation from a gain-switched Tm-doped fiber laser[J]. Opt Lett, 2007, 32(13): 1797-1799.
- 4 Simakov N, Hemming A, Bennetts S, et al.. Efficient,

- polarised, gain-switched operation of a Tm-doped fibre laser[J]. Opt Express, 2011, 19(16): 14949-14954.
- 5 Jackson S D, King T A. High-power diode-cladding-pumped Tm-doped silica fiber laser[J]. Opt Lett, 1998, 23(18): 1462-1464.
- 6 Swiderski J, Maciejewska M, Kwiatkowski J, et al.. An all-fiber, resonantly pumped, gain-switched,  $2\ \mu\text{m}$  Tm-doped silica fiber laser[J]. Laser Phys Lett, 2013, 10(1): 015107.
- 7 Jackson S D. Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser[J]. Nature Photon, 2012, 6(7): 423-431.
- 8 Li J, Hu T, Jackson S D. Q-switched induced gain switching of a two-transition cascade laser[J]. Opt Express, 2012, 20(12): 13123-13128.
- 9 Tang Y, Xu L, Yang Y, et al.. High-power gain-switched Tm<sup>3+</sup>-doped fiber laser [J]. Opt Express, 2010, 18(22): 22964-22972.
- 10 Yan Fengping, Wei Huai, Fu Yongjun, et al.. Tm<sup>3+</sup> doped cladding pumped silica optic fiber laser[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(9): 6400-6403.
- 延凤平, 魏 淮, 傅永军, 等. 石英基掺 Tm<sup>3+</sup> 包层抽运光纤激光器[J]. 物理学报, 2009, 58(9): 6400-6403.
- 11 Liu Jiang, Xu Jia, Wang Qian, et al.. High-pulse-energy passively mode-locked  $2.0\ \mu\text{m}$  thulium-doped ultrafast all-fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0602009.
- 刘 江, 徐 佳, 王 潜, 等. 高能量全光纤结构被动锁模  $2.0\ \mu\text{m}$  掺铥超短脉冲光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0602009.
- 12 Wang Pu, Liu Jiang. Progress and prospect on ultrafast Tm-doped fiber laser at  $2\ \mu\text{m}$  wavelength[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0601002.
- 王 璞, 刘 江.  $2.0\ \mu\text{m}$  掺铥超短脉冲光纤激光器研究进展及展望[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0601002.
- 13 Creeden D, Ketteridge P A, Budni P A, et al.. Mid-infrared ZnGeP<sub>2</sub> parametric oscillator directly pumped by a pulsed  $2\ \mu\text{m}$  Tm-doped fiber laser[J]. Opt Lett, 2008, 33(4): 315-317.
- 14 Zhou Fuzheng, Ma Guobin, Shen Liqing, et al.. Studies on the ps gain-switching of a semiconductor laser [J]. Acta Physica Sinica, 1994, 43(4): 580-590.
- 周复正, 马国彬, 沈丽青, 等. 半导体激光器的微微秒增益开关特性研究[J]. 物理学报, 1994, 43(4): 580-590.
- 15 Wang Yuncai. Experimental study on the timing jitter of gain-switched laser diodes with photon injection [J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(9): 2190-2193.
- 王云才. 增益开关半导体激光器在外光注入下脉冲抖动的实验研究[J]. 物理学报, 2003, 52(9): 2190-2193.
- 16 Wang Xufang, Yao Minyu, Xu Lei, et al.. Numerical simulation of self-seeding for timing jitter reduction in a gain-switched distribution feedback laser [J]. Acta Physica Sinica, 2000, 49(3): 475-479.
- 王徐芳, 姚敏玉, 徐 磊, 等. 自注入减小增益开关分布反馈激光器时间抖动的数值模拟[J]. 物理学报, 2000, 49(3): 475-479.
- 17 Jackson S D, Dickinson B C, King T A. Sequence lasing in a gain-switched Yb<sup>3+</sup>, Er<sup>3+</sup>-doped silica double-clad fiber laser[J].



Appl Opt, 2002, 41(9): 1698–1703.

18 Nakagami H, Araki S, Sakata H. Gain-switching pulse generation of Tm-doped fiber ring laser pumped with 1.6- $\mu\text{m}$  laser diodes[J]. Laser Phys Lett, 2011, 8(4): 301–304.

19 Yang J L, Tang Y L, Xu J Q. Hybrid-pumped, gain-switching operation of a Tm-doped fiber laser with linear-polarized output [J]. Laser Phys Lett, 2013, 10(5): 055104.

栏目编辑：宋梅梅

## 西安交通大学张镇西课题组翻译版《医学纳米技术与纳米医学》面世

纳米技术如今的发展突飞猛进,发展前景广阔,但其技术仍未成熟。此外在纳米技术应用于医学的研究过程中,也需要找到其研究与社会效益之间的一个微妙的平衡点;与此同时,对于不同程度的读者来说,也亦需要一本实用易懂的关于纳米技术及其发展的基本信息的一本书。《医学纳米技术与纳米医学》通过使用一些通俗易懂的语言来介绍纳米医学及其不断发展的基本信息框架,正好满足了这些方面的需求。

该书探讨了纳米技术的广泛应用对医学、生物医学科学的影响,以及更广泛的对社会和经济的影响。抛开技术的细节不谈,本书的目的着重于提高读者在医疗应用中商业、监管、行政等各方面的认识。本书将带领读者进入一个严谨、平衡且真实的当代纳米医疗的世界中。此外,本书还描绘出了纳米医疗未来的美好前景,这将有助于读者建立一个良好的基础,在进一步的探索纳米技术应用的过程中,能更好的规划和决策。该书介绍纳米技术在医疗领域的应用,包括成像、诊断和监护、药物传输系统、外科手术、组织的再生,以及在人造器官方面的应用等。纳米技术系列的观点中广泛包含了关于纳米技术的社会影响和效益。该书可以作为一本独立的参考书而使用。

该书的主要内容包括:探索纳米医学的背景、概念和术语,以及最近的潮流和从事这方面研究的主要机构和成员。调查纳米医疗在政府、学院和私人机构的发展概况。展现未来,对纳米医学未来发展的方向、发展的潜力、可持续性等进行科学预测,以及让读者学会在纳米技术的应用过程中应该如何做出取舍。包含了很多图示说明、标示和关键词,有助于读者理解本书,从而达到深化概念和方便更深入的研究。在将纳米技术应用于医学的发展过程中,不可避免地出现了一些多义甚至有歧义的相关概念。该书在评估这些概念的时候,严谨地咨询了相关的行业先驱以及许多纳米技术的革新者,并查阅了一些权威的实验室的工作成果。通过使用生动的例子和实例总结来描述这些被证实了的成果并描绘出未来的发展前景。原书作者德克萨斯大学阿灵顿分校的哈里 F. 蒂鲍斯教授为中文版的书撰写了“中文版前言和作者的访谈录”。

《医学纳米技术与纳米医学》(Medical Nanotechnology and Nanomedicine)(Harry F. Tibbals 著)原书由 Taylor Francis Group 的 CRC Press 出版,西安交通大学张镇西课题组翻译,该书已经由西安交通大学出版社 2013 年 12 月出版。该书是继张镇西课题组已经翻译的《激光与生物组织的相互作用——原理及应用》(西安交通大学出版社 1999 年 4 月)、《医学工作者的因特网》(西安交通大学出版社 2000 年 6 月)、《分子光子学》(科学出版社 2004 年 4 月)、《激光与生物组织的相互作用原理及应用》(第 3 版)(2005 年 8 月)、《纳米光子学》(西安交通大学出版社 2010 年 8 月)(该书获 2010 年度(第十届)引进版科技类优秀图书奖)五部、主编《生物医学光子学新技术及应用》(科学出版社 2008 年 5 月)之后张镇西课题组在研究工作中多次翻译的另一部国外的优秀专著。