

# 掺 Er<sup>3+</sup> 钨碲玻璃光纤放大器的特性研究

朱茂华, 张淑芳, 谷彤昭

(大连海事大学信息工程学院, 辽宁大连 116026)

**摘 要:** 以 WO<sub>3</sub>、TeO<sub>2</sub>、ZnO 和 Na<sub>2</sub>O 为基质制备了掺 Er<sup>3+</sup> 钨碲(EDWTZn)玻璃. 差热分析表明 EDWTZn 玻璃的转变温度达到 427℃, 比常规碲酸盐玻璃具有更高的热稳定性. McCumber 原理研究的结果显示, EDWTZn 玻璃在 1530nm 处的峰值受激发射截面和荧光发射半高宽分别为  $9.52 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$  和 86nm. 数值模拟结果表明, EDWTZn 光纤放大器利用较短的激活长度就可获得足够的信号光放大, 在 1530nm 波长附近能提供极宽的平坦增益带, 当输入信号光功率为 0dBm 时, 在大约 70nm 带宽范围内的平均信号增益大于 20dB, 不平坦度小于 5dB.

**关键词:** 掺 Er<sup>3+</sup> 钨碲玻璃; 发射截面; 掺钕光纤放大器; 增益; 速率方程; 传输方程

**中图分类号:** TN929.11; TQ171 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2007)09-1706-04

## Properties of Er<sup>3+</sup>-Doped Tungsten-Tellurite Glass Optical Fiber Amplifier

ZHU Mao-hua, ZHANG Shu-fang, GU Tong-zhao

(Information Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China)

**Abstract:** Er<sup>3+</sup> doped tungsten tellurite glass (EDWTZn) is prepared, whose host compositions are WO<sub>3</sub>, TeO<sub>2</sub>, ZnO and Na<sub>2</sub>O. The differential thermal analysis shows that compared with the traditional glasses, the thermal stability of EDWTZn glass is higher. The results analyzed by McCumber theory also show that the peak stimulated emission cross section and the FWHM of EDWTZn glass around 1530nm are  $9.52 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$  and 86nm, respectively. As for the EDWTZn optical fiber amplifier, the results of numerical simulation show that large amplified signals can be obtained with a shorter length of fiber, and about 70nm flat gain band around 1530nm can be provided.

**Key words:** Er<sup>3+</sup>-doped tungsten tellurite glass; emission cross section; EDFA; gain; rate equation; propagation equation

## 1 引言

随着通信业务的飞速发展, 常规 EDFA 已不能满足高速大容量通信传输的要求. 为了获得频带宽、增益平坦的光纤放大器, 寻找新的放大材料, 使光纤放大器放大性能向 L 波段扩展已成为当务之急. 碲酸盐玻璃具有较宽的传送区域、良好的玻璃稳定性、高的稀土可溶性、慢的腐蚀速率以及高的折射率等特性, 且在 1530nm 波长附近展示了较宽的平坦增益带, 使光纤放大器的放大性能一直延伸到 L 波段, 这是硅酸盐玻璃和磷酸盐玻璃所不能比拟的, 所以其已成为光电子应用领域中的重要光学材料<sup>[1~3]</sup>. 但是, 作为 EDFA 的基质, 碲酸盐玻璃也有两个明显的缺点: 首先, 玻璃的声子能较低, 这使  $\text{Er}^{3+}: {}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  的非辐射跃迁速率太慢, 不利于光的泵浦. 其二, 碲酸盐玻璃的转变温度较低, 使其在高强度

光的照射下容易受到损害. 为此, 本文研制了掺钕钨碲酸盐玻璃(EDWTZn), 通过差热分析和 McCumber 原理对其热特性和光谱特性进行了讨论. 同时对 EDWTZn 光纤放大器进行了数值模拟, 分析了其增益和噪声特性. 结果表明 EDWTZn 光纤放大器可望成为 WDM 光纤通信系统中一种理想的掺钕光纤放大器.

## 2 样品制备及其光谱分析

制备的 EDWTZn 玻璃摩尔组份为 40WO<sub>3</sub>-40TeO<sub>2</sub>-10ZnO-10Na<sub>2</sub>O, Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的掺杂浓度为 1wt%. 实验中称量 20g 批料, 经研磨混合均匀后, 放入陶瓷坩埚内, 在 850℃ 的炉中熔化 30min. 然后将玻璃溶液注入预热过的铜模具, 在 380℃ 退火 2h, 再以 10℃/h 的速度降至室温. 退火后的玻璃被切割、抛光成  $10 \times 10 \times 2 \text{ mm}^3$  的待测样品.

用 TGA/SDTA 851° 热分析仪测量样品的转变温度

和晶化温度; 用 Lambda 900 型分光光度计测试玻璃的吸收光谱, 测量范围 350nm~ 1700nm; 用 976nm 的 LD 作泵浦源, SB500 单色仪和 InGaAs 光电倍增光测量其荧光光谱, 扫描范围 1400nm~ 1700nm. 所有测试均在室温下进行.

差热分析测量显示, EDWTZn 玻璃的转变温度为 427℃, 比常规掺铒碲玻璃的值 (约为 290℃左右) 高出了 130 多度. 表明该玻璃具有良好的热稳定性, 对防止光纤放大器在高强度光照射下受到损害较为有利.

受激发射截面和荧光发射半高峰宽度是光纤放大器实现宽带放大的两个重要参数. EDWTZn 玻璃在 1530nm 处的发光是由  $\text{Er}^{3+}: {}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  能级之间的跃迁产生, 利用玻璃的吸收光谱, 由下式可以计算波长  $\lambda$  处的吸收截面  $\sigma_a(v)$

$$\sigma_a(v) = \frac{2.303 \log(I_0/I)}{NL} \quad (1)$$

式中  $\log(I_0/I)$  为样品的吸收系数;  $L$  为样品的厚度;  $N$  为样品中稀土离子的浓度 (ions/cm<sup>3</sup>). 根据 McCumber 原理<sup>[4]</sup>,  $\text{Er}^{3+}: {}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  跃迁的发射截面可由其吸收截面得到, 即

$$\sigma_e(v) = \sigma_a(v) \exp[(\varepsilon - h\nu)/kT] \quad (2)$$

式中  $\sigma_a(v)$ 、 $\sigma_e(v)$  分别表示吸收和发射截面;  $v$  是光子的频率;  $h$ 、 $k$  分别为普朗克常数和玻尔兹曼常数;  $\varepsilon$  是与温度有关的常量. 图 1 给出了 EDWTZn 玻璃在 1530nm 波长附近的吸收和发射截面谱, 其峰值吸收和发射截面  $\sigma_a(v)$ 、 $\sigma_e(v)$  分别为  $8.65 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$  和  $9.52 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ , 比常规掺铒碲酸盐玻璃的值大 13.4%<sup>[5]</sup>. 在 1530nm 波长附近的荧光发射半高峰宽度达到 86nm, 比常规掺铒碲酸盐玻璃高出 16nm<sup>[5]</sup>. EDWTZn 玻璃受激发射截面和带宽的增加与其结构有关,  $\text{WO}_3$  和  $\text{TeO}_2$  都是玻璃网络生成体, 且在玻璃中含有大致相同的比例. 由于两种生成体不同构, 从而产生了更为复杂的网络结构及其配位场强度, 进而造成了光谱曲线的非均匀加宽. 此外,  $\text{WO}_3$  的加入也造成了 EDWTZn 玻璃比常规碲酸盐玻璃具有更高的声子能, 明显地减少了 EDWTZn 玻璃中  $\text{Er}^{3+}$  离子的上转换发光现象, 起到了增加光纤放

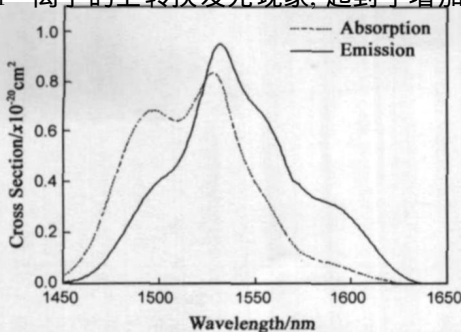


图 1 EDWTZn 玻璃在 1530nm 附近的吸收和发射截面

大器的泵浦效率, 降低噪声特性的效果.

### 3 EDWTZn 光纤放大器的增益和噪声特性分析

由 EDFA 的放大机理可知, EDFA 通常可被简化为三能级系统. 但是, 对于碲基掺铒光纤放大器而言, 碲酸盐玻璃光纤可以掺杂较高浓度的  $\text{Er}^{3+}$ , 而高浓度的铒掺杂也带来了  $\text{Er}^{3+}$  的能量上转换 ( $2^4I_{13/2} \rightarrow 4I_{9/2} + 4I_{15/2}$ )、交叉弛豫 ( $4I_{9/2} + 4I_{15/2} \rightarrow 2^4I_{13/2}$ ) 和激发态吸收 ( $4I_{13/2} \rightarrow 4I_{9/2}$ ) 效应, 这些效应的存在使得 980nm 或 1480nm 泵浦下的 EDWTZn 光纤放大器需要用四能级系统来处理<sup>[6]</sup>, 如图 2

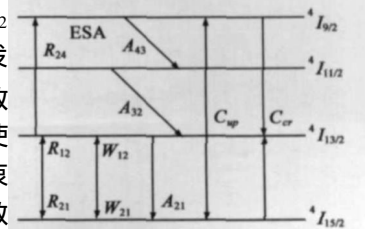


图 2  $\text{Er}^{3+}$  四能级示意图

所示. 在稳态条件下, EDWTZn 光纤放大器的速率方程可以表示为

$$\frac{dN_1}{dt} = -W_{12}N_1 - W_{21}N_2 - R_{12}N_1 + R_{21}N_2 + A_{21}N_2 + C_{sp}N_2^2 - C_{cr}N_1N_4 \quad (3)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{12}N_1 - W_{21}N_2 + R_{12}N_1 - R_{21}N_2 - A_{21}N_2 + A_{32}N_3 - 2C_{sp}N_2^2 + 2C_{cr}N_1N_4 - R_{24}^{ESA}N_2 \quad (4)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = -A_{32}N_3 + A_{43}N_4 \quad (5)$$

$$\frac{dN_4}{dt} = C_{sp}N_2^2 - C_{cr}N_1N_4 - A_{43}N_4 + R_{24}^{ESA}N_2 \quad (6)$$

式中  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ 、 $N_4$  分别是  $\text{Er}^{3+}$  能级  $4I_{15/2}$ 、 $4I_{13/2}$ 、 $4I_{11/2}$  和  $4I_{9/2}$  上的粒子数密度;  $N$  是光纤中  $\text{Er}^{3+}$  的掺杂浓度, 其中  $N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4$ .  $A_{43}$  和  $A_{32}$  是能级  $4I_{9/2} \rightarrow 4I_{11/2}$ 、 $4I_{11/2} \rightarrow 4I_{13/2}$  的非辐射跃迁几率,  $A_{21}$  是能级  $4I_{13/2} \rightarrow 4I_{15/2}$  的自发辐射跃迁几率.  $C_{sp}$ 、 $C_{cr}$  分别是  $\text{Er}^{3+}$  能量上转换系数和交叉弛豫系数.  $W_{12/21}$  和  $R_{12/21}$  分别为信号光和泵浦光的受激吸收/受激发射几率,  $R_{24}^{ESA}$  是激发态吸收 (ESA) 几率. 这五个几率表达式分别为

$$W_{12}(z) = \frac{\Gamma_s \sigma_{12}(\lambda_s) \lambda_s}{hcA_c} P_s(z, \lambda_s) + \sum_k \frac{\Gamma_s \sigma_{12}(\lambda_k)}{hcA_c} \cdot [P_{ASE}^+(z, \lambda_k) + P_{ASE}^-(z, \lambda_k)] \lambda_k \Delta \lambda_k \quad (7)$$

$$W_{21}(z) = \frac{\Gamma_s \sigma_{21}(\lambda_s) \lambda_s}{hcA_c} P_s(z, \lambda_s) + \sum_k \frac{\Gamma_s \sigma_{21}(\lambda_k)}{hcA_c} \cdot [P_{ASE}^+(z, \lambda_k) + P_{ASE}^-(z, \lambda_k)] \lambda_k \Delta \lambda_k \quad (8)$$

$$R_{12}(z) = \frac{\Gamma_p \sigma_{12}(\lambda_p) \lambda_p}{hcA_c} P_p(z, \lambda_p) \quad (9)$$

$$R_{21}(z) = \frac{\Gamma_p \sigma_{21}(\lambda_p) \lambda_p}{hcA_c} P_p(z, \lambda_p) \quad (10)$$

$$R_{24}^{ESA}(z) = \frac{\sigma_{24}(\lambda_s)}{hcA_c} P_s(z, \lambda_s) + \frac{\sigma_{24}(\lambda_p)}{hcA_c} P_p(z, \lambda_p) + \sum_k \frac{\Gamma_s \sigma_{24}(\lambda_k)}{hcA_c} [P_{ASE}^+(z, \lambda_k) + P_{ASE}^-(z, \lambda_k)] \lambda_k \Delta \lambda_k \quad (11)$$

式中  $\sigma_{12}(\lambda)$ 、 $\sigma_{21}(\lambda)$  和  $\sigma_{24}(\lambda)$  分别是  $\text{Er}^{3+}$  在对应波长处的吸收截面、发射截面和激发态吸收截面,  $A_c$  是纤芯截面积;  $P_{s/p}(z, \lambda_{s/p})$  表示信号光/泵浦光的功率;  $P_{ASE}^{\pm}(z, \lambda_k)$  是前向、后向放大的自发辐射功率;  $\Gamma_{s/p}$  为信号光/泵浦光的重叠因子. 本文研究的是双包层单模弱导光纤, 且  $\text{Er}^{3+}$  在纤芯内均匀分布, 故可以用高斯分布来近似表示纤芯中信号光和 ASE 光场的横向归一化强度分布<sup>[7]</sup>.

在同向泵浦下, 信号光、泵浦光和 ASE 光在光纤中的传输放大行为可用下述耦合传播方程来描述<sup>[8]</sup>, 即

$$\frac{dP_p(z, \lambda_p)}{dz} = -\Gamma_p[\sigma_{12}(\lambda_p)N_1(z) - \sigma_{21}(\lambda_p)N_2(z)] \cdot P_p(z, \lambda_p) - \alpha(\lambda_p)P_p(z, \lambda_p) \quad (12)$$

$$\frac{dP_s(z, \lambda_s)}{dz} = -\Gamma_s[\sigma_{21}(\lambda_s)N_2(z) - \sigma_{12}(\lambda_s)N_1(z)]P_s(z, \lambda_s) - \alpha(\lambda_s)P_s(z, \lambda_s) \quad (13)$$

$$\frac{dP_{ASE}^{\pm}(z, \lambda_k)}{dz} = \pm 2h \frac{c^2}{\lambda_k^3} \Delta \lambda_k \Gamma_s \sigma_{21}(\lambda_k)N_2(z) \pm \Gamma_s[\sigma_{12}(\lambda_k)N_2(z) - \sigma_{21}(\lambda_k)N_1(z)]P_{ASE}^{\pm}(z, \lambda_k) \quad (14)$$

利用上述传输方程, 考虑边界条件:  $P_p(0) = P_p^{\text{in}}$ ,  $P_s(0) = P_s^{\text{in}}$ ,  $P_{ASE}^+(z=0, \lambda_k) = P_{ASE}^-(z=L, \lambda_k) = 0$ , 其中  $1450\text{nm} < \lambda_k < 1650\text{nm}$ ,  $L$  是光纤长度, 就可以对 EDWTZn 光纤放大器增益特性进行理论研究.

图 3 给出了信号波长 1550nm 处(输入信号光功率  $P_s$  为 -30dBm), 泵浦波长为 1480nm, 泵浦功率  $P_p$  分别为 33.01dBm, 36.02dBm 和 37.78dBm 时, 信号增益与激活光纤长度的关系. 它表明, 在泵浦功率一定时, 信号增益随着光纤长度非线性增加, 并且在一个最佳长度上达到最大值, 而最佳长度又随泵浦功率增加而增大, 在大于最佳长度时, 光信号被再吸收而衰减. 从该图还可以看出, 在光纤长度 80cm 处, 信号增益就已超过 30dB, 所以对于 EDWTZn 光纤, 利用较短的激活长度就可以形成粒子数反转而实现信号光的放大. 计算中所用其它参数为: 纤芯直径 4.6 $\mu\text{m}$ ; 包层直径 44.5 $\mu\text{m}$ ; 背景损耗系数假设 1dB/m;  $A_{21} = 386.1/\text{s}$ ;  $A_{32} = A_{43} = 10^9/\text{s}$ ;  $C_{up} = 5.0 \times 10^{-23}\text{m}^3/\text{s}$ ;  $C_{\sigma} = 3.5 \times 10^{-22}\text{m}^3/\text{s}$ ;  $\sigma_{a24} = 0.5 \times 10^{-25}\text{m}^2/\text{J}$ .

图 4 给出了  $P_p$  为 36.02dBm, 光纤长度为 100cm,  $P_s$  分别为 -30dBm, -10dBm 和 0dBm 时, 模拟计算得到的 EDWTZn 光纤放大器的增益与信号波长的关系曲线. 它表明当  $P_p$  一定时, 信号的增益随着输入信号光功率的增大而减小, 这是信号光功率引起的增益饱和造成的. 从图 4 还可看出, 信号的增益随着输入信号光功率的增大而趋于平坦, 当输入信号光功率达到 -10dBm 时, 1556nm 附近的增益峰基本消失, 增益谱在以 1570nm 为

中心的大约 65nm 带宽范围内的不平坦度小于 5dB, 而平均信号增益仍在 30dB 以上. 当输入信号光功率增加到 0dBm 时, 增益谱变得更加平坦, 不平坦度小于 5dB 的带宽范围达到 70nm, 尽管增益下降了, 但平均信号增益仍在 20dB 以上. 这个结果表明, EDWTZn 光纤放大器在 1530nm 波长附近提供了极宽的平坦增益带, 而具有平坦的增益谱对于未来实现高容量光路和全光网络是头等重要的.

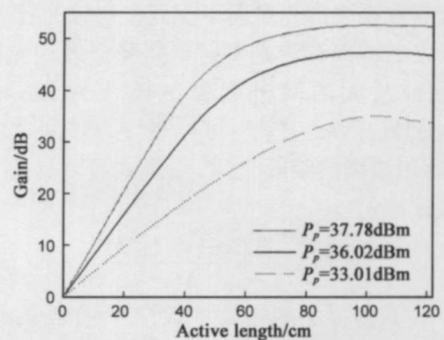


图 3 不同泵浦功率的增益与光纤长度的关系

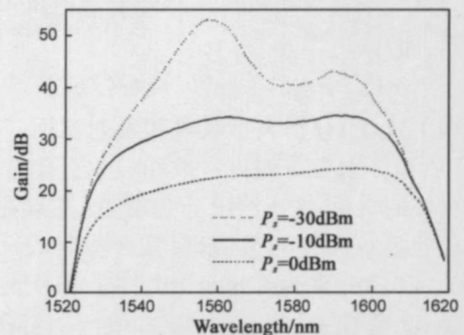


图 4 不同输入信号功率的增益与信号波长的关系

图 5 给出了  $P_s$  为 -30dBm 的小信号情况下( $P_p$  为 33.01dBm), 正向传播的 ASE 功率与信号波长的关系. 由图中可知, 正向传播的 ASE 最大功率为 5.65mW, 位于 1561nm 处. 图 6 表明, 在小信号情况下, 正向传播的 ASE 的功率随光纤长度的增加而增大, 反向传播的 ASE 功率则随之减小, 其最大值为 7.42mW, 略大于正向 ASE 信号.

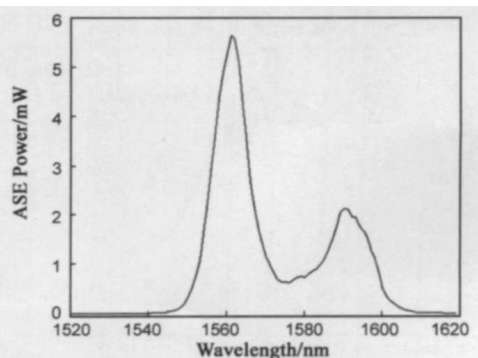


图 5 正向传播的 ASE 功率与信号波长的关系

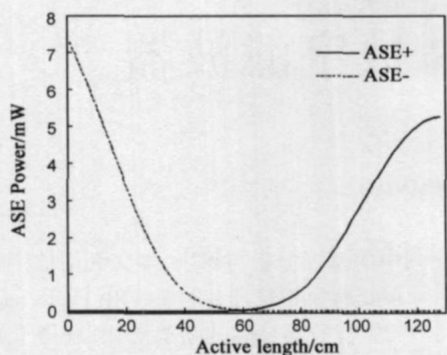


图 6 正向和反向传播的 ASE 功率随光纤长度的变化曲线

#### 4 结论

我们制备了以  $\text{WO}_3$ 、 $\text{TeO}_2$ 、 $\text{ZnO}$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  为基质的 EDWTZn 玻璃。差热分析表明 EDWTZn 玻璃具有更高的热稳定性。应用 McCumber 原理得到的 EDWTZn 玻璃在 1530nm 处的受激发射截面和荧光发射半高宽值分别为  $9.52 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$  和 86nm, 这两个值都高于常规碲酸盐玻璃。数值模拟计算结果表明, 对于 EDWTZn 光纤放大器而言, 利用较短的激活长度就可获得足够的信号光放大。当输入信号光功率为 -10dBm 时, 增益谱在以 1570nm 为中心的大约 65nm 带宽范围内的不平坦度小于 5dB, 而平均信号增益仍在 30dB 以上。说明 EDWTZn 光纤放大器在 1530nm 波长附近提供了极宽的平坦增益带, 因此 EDWTZn 光纤放大器可成为 WDM 光纤通信系统中一种理想的掺铒光纤放大器。

#### 参考文献:

- [1] Wang J S, Vogel E M, Snizer E. Tellurite glass: A new candidate for fiber devices[J]. Optical Materials, 1994, 3(4): 187-203.
- [2] Mori A, Kobayashi K, Yamada M, et al. Low noise broadband tellurite based  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber amplifiers[J]. Electronics Letters, 1998, 34(9): 887-888.

- [3] Ding Y, Jiang S B, Hwang B H, et al. Spectral properties of erbium doped lead halotellurite glasses for 1.5 broadband amplification[J]. Optical Materials, 2000, 15(1): 123-130.
- [4] McCumber, D E. Theory of phonon terminated optical masers [J]. Physics Review A 1964, 134(2A): 299-306.
- [5] Gu T Z, Zhu M H. Spectroscopic properties of  $\text{Er}^{3+}$  doped  $\text{TeO}_2\text{PbCl}_2\text{ZnO-Na}_2\text{O}$  glasses [J]. Optoelectronics Laser, 2004, 15(11): 1339-1342.
- [6] López Barbero A P, Arellano Espinoza W A, et al. Tellurite based optical fiber amplifier analysis using the finite element method[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2000, 25(2): 103-107.
- [7] Achtenhagen M, Beeson R J, Pan F, et al. Gain and noise in ytterbium sensitized erbium doped fiber amplifiers: measurements and simulations[J]. Lightwave Technology, 2001, 19(10): 1521-1526.
- [8] Mirek Karasek. Optimum design of  $\text{Er}^{3+}$ - $\text{Yb}^{3+}$  codoped fibers for large signal high pump power applications [J]. Quantum Electron, 1997, 33(10): 1699-1705.

#### 作者简介:

朱茂华 女, 1969 年出生, 副教授, 1994 年毕业于哈尔滨工业大学。目前主要研究方向: 通信系统及光纤放大器、光波导材料和器件的研制等。E-mail: zhu0525@newmail.dlmu.edu.cn



张淑芳 女, 1955 年出生, 教授, 博士, 博士生导师, 曾留学于美国华盛顿大学电子系, 现任大连海事大学信息工程学院院长, 辽宁省交通安全与通信技术重点实验室主任。主要从事全球定位系统的理论与应用、无线通信技术、嵌入式系统设计以及数据处理等领域的教学和研究工作。现任中国电子学会导航分会委员, 中国航海学会通信导航委员会委员, 美国导航学会国际会员, 国家智能交通系统专家咨询委员会委员。2002 年开始参与国家的伽利略计划, 承担了欧盟 EGNOS 首次中国动态测试项目。目前, 正在进行 GNSS 接收机技术的研究。E-mail: szhang@dlmu.edu.cn