

先进通信技术译丛

Fibre Optic Communication Devices

# 光纤通信器件

[德] N.Grote H.Venghaus 编

王景山 沈欣捷 孙 玮 译

国防工业出版社

先进通信技术译丛

**Fibre Optic Communication Devices**

# 光纤通信器件

[德] N. Grote     H. Venghaus

王景山 沈欣捷 孙玮 译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记号 图字:军-2001-021号

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信器件王景山等译. —北京:国防工业出版社,  
2003.7

(先进通信技术译丛)

书名原文: Fibre Optic Communication Devices

ISBN 7-118-03067-8

I. 光... II. ①格...②维...③王... III. 光纤通  
信-电子元件 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 007987 号

Translation from the English language edition:

Fibre Optic Communication Devices edited by Norbert Grote and Herbert Venghaus

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2001

Springer-Verlag is a company in Bertelsmann Springer publishing group

All Rights Reserved

本书中文版由 Springer 出版社授予国防工业出版社独家出版发行。版  
权所有,侵权必究。

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新艺印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 16 $\frac{3}{4}$  427 千字

2003 年 7 月第 1 版 2003 年 7 月北京第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:31.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

## 译者序

光电子技术主要研究光(特别是相干光)的产生、传输、控制和探测,是光学技术和电子技术的融合。光电子技术与微电子技术的结合,以及在各种技术领域的应用,产生并形成了一系列的交叉学科和应用技术领域。这些技术应用的快速发展及向其他科技领域的渗透,形成了市场可观、发展潜力巨大的光电子产业,如光纤通信系统。光电子技术已成为支撑未来信息技术的脊梁,成为信息产业的支柱,而光纤通信技术作为光电子技术的一个重要应用,得到了越来越快的发展,成为当今信息技术发展的一个重要标志。

从光纤通信系统的发展可以明显地看到材料、器件和单元技术的关键作用。20世纪70年代由于解决了低损耗石英玻璃光纤和长寿命、高稳定砷化镓半导体激光器,使光纤通信系统走向实用化。90年代采用了光纤放大器技术和波分复用技术(WDM),建立了高信息量、长距离光纤通信系统。21世纪初发展了密集波分复用技术(DWDM)及信息打包(IP)分送和交换技术,使信息传输速度达到1Tb/s以上。

光技术在通信网络中的实际应用已经有二三十年的历史了,在提供大容量、长距离传输信道方面取得了长足的发展。通信业务的发展和下一代网络技术的提出,对光传输技术提出了新的要求,这就是构建一个宽带、高速、智能化的光传送层。光器件是光通信系统的核心,不仅影响通信系统的性能,还对整个系统的成本有极大的影响,光器件的研制和市场化一直是光通信技术的发展重点。而光放大器是实现光中继器的关键,它的增益、平坦增益宽度、噪声系数等对DWDM有很大影响。EDFA(掺铒光纤放大器)可以满足C波段的波分复用要求,但随着光通信系统的工作波长

向 L 波段和 S 波段扩展,必须研制新型的光放大器。新型 EDFA 可以覆盖 L 波段,利用光纤非线性喇曼效应进行光放大的喇曼放大器可以在 L 和 S 波段具有很好的平坦增益和较小的噪声系数,但增益小。因此,宽带 EDFA 和喇曼放大器组合使用将是一种发展趋势。我国的光电子器件技术发展与国际基本同步,但在技术水平和产业化程度上,与国际先进水平相差较大,拥有自主创新知识产权的先进技术很少;研发仍处于跟踪科研和小批量生产阶段;光电器件和部件有很大部分不能配套,不能满足整机和系统的需要,难于组织创新攻克和掌握核心技术等。为了普及光纤通信技术,提高认识,我们从众多的光纤通信器件方面书籍中选择了这本《光纤通信器件》,并精心翻译,期望对大家有所帮助。

本书全面介绍了光纤通信网络中所用的各种器件,包括光纤、光导体激光器、半导体光电二极管、光放大器、波长选择器、光开关及各种类型的集成器件(玻璃集成器件、混合集成器件与单片集成器件),并从原理、结构、性能参数、材料、制造工艺、应用以及今后的发展趋势等各方面进行了全面的阐述。对于从事光纤通信领域的研究人员和生产人员及大专院校学生有较好的参考价值。光纤通信器件涉及的范围比较广泛,各个器件之间的差别很大,共同点较少。由一个人将所有的光纤器件都写得很透彻是不容易的,本书由欧美及日本等 9 国共 30 名光纤器件领域的专家共同完成,各人侧重点不同,较全面深入地探讨了这些器件的原理和结构。本书虽然由多人合作完成,但各章节分工明确,各有侧重,互相呼应并相互配合,介绍评论客观全面,理论分析透彻,应用实例典型,并特别强调了 20 世纪 90 年代以来光纤器件的新进展及今后的发展趋势。

参加本书翻译的 3 位同志均是多年从事光纤通信器件研究和生产的专业人员,中科院半导体所光电子研究发展中心刘育梁研究员对全书进行了审校。在本书的翻译过程中得到了广大朋友的热心支持和帮助,在此特别感谢中科院梁骏吾院士、清华大学博士生导师王秀山教授,王钺博士、杨林、贺日娇、邱海军、田珂珂、张松

伟、方青和辛红丽等同志在翻译和审校过程中给予的大力支持和帮助。

由于译者水平有限,不足之处敬请广大读者批评指正。

# 前 言

现代通信技术的发展已经使社会和经济在全球范围内发生了彻底的变化,其关键特征之一就是传输速度在不断增长,而其成本却越来越低。这在很大程度上应归功于电子学的发展,同时更应归功于以光纤为基础的光通信能力的大幅度提高。原本只是为了改进传统的信息交换而采用的光通信技术,由于网络通信量的惊人增长,现已成为现代通信技术的一个关键的先决条件。而且,根据预测,未来网络通信量将以每年 100%~200% 的速度增长,为了实现并保持这种增长速度,光通信技术将变得更加重要。

本书的目的是论述光通信系统中的功能组件,特别是它们的基础、原理和现状,以及未来的发展趋势。因此,编者希望本书不仅吸引已经在该领域工作的专家的注意,而且至少还可指导与此有关的后来者。本书共 11 章,详细介绍了基本的光学组件与光电子组件,这些组件构成了当今绝大多数也是未来的光通信网络硬件的基础。本书冲破了以往一贯的著书概念,将具有阅读价值的经典文章都收入其中。所以,在某些情况下,内容会出现少量的重叠。这些文章都是由不同的作者与合作者们撰写的,他们都是在各自领域有所建树的知名专家(在本书后附有他们的简介)。编写本书不仅要求对技术知识有广泛深入的理解,而且还要求对读者具有启发性,因此,编者深切感谢这些专家们在百忙中仍参与本书的编写工作。

第 1 章论述了光通信系统的特点和基本原理,介绍了光通信系统重要的组件及其功效,为随后的各章建立了框架,使之针对不同的组件做更详细的说明。

光发射机、光接收机以及两者间的光纤通路是任何光通信系

统的最基本部分。因此,与组件有关的前3章将集中讨论这3部分内容。

第2章介绍了光信号在光网中传播的传递媒介——光纤。首先,对光纤的波导性质作了详尽的理论分析,从中推导出各种设计方案,还介绍了光纤材料及其光学性质,论述了光纤中高强度传输所发生的非线性效应,最后,给出脉冲传播出现的问题及其解答。

第3章论述了用于光发射的二极管激光器。对激光的基本性质进行了理论分析,同时介绍了激光器的结构设计及单模激光器对于克服光传输中光纤色散的重要性。同时论述了这些器件理论与实际的差别,并略述了波长可调谐激光器。

第4章论述了光电二极管和光接收器。集中介绍了已研制出的多种结构的光电二极管及其光电特性。最后讨论了带有电子放大器的光接收机,并介绍了实现单片集成的技术途径。

光放大器已经使光网发生了彻底变化,使光信号可以传输数百千米而无需进行光电转换。目前,掺铒光纤放大器已在 $1.55\mu\text{m}$ 的传输窗口应用中占有很大优势,这种类型的放大器在5.2节讨论,5.3节将讨论半导体光放大器,半导体光放大器在原则上能应用到 $1.3\mu\text{m}\sim 1.6\mu\text{m}$ 范围带宽中任何需要的波长上,但实际上,在 $1.3\mu\text{m}$ 波长这个窗口上,光纤放大器的效果不佳,而半导体光放大器则更为适用。

第6章论述了玻璃集成光学器件,包括无源和有源器件。无源器件因其损耗低且技术成熟,已经发展成为标准的商业产品,与此同时,有源器件却仍处于实验室阶段,除了紧凑之外,玻璃有源器件最终仍可实现很高的功能。到目前为止,有源玻璃组件仍有大量尚未解决的技术难题,因而阻碍了它们与已被广泛使用的以光纤为基础的同类器件之间的竞争。第6章重点介绍玻璃集成光学器件复杂的物理机制和相关的技术问题,并介绍了多重掺杂结构对波导的重要影响,同时也涵盖了多种器件样品。

波分复用(WDM)最初主要是为了增强光纤的传输能力而采用的,即一根光纤可同时传送100多个信道。此外,它能够实现高

效率的通信能力,尤其是 WDM 与波长转换技术结合起来将显著地增加光网的功能。其关键元件就是波长选择发射机,以及相应的波长选择器件,诸如解复用器和滤波器等。这些对于 WDM 都是至关重要的,将在第 7 章中介绍。法布里-珀罗型与多层介质滤波器已经有批量产品上市。同时依赖光栅的器件也同样重要,例如光纤中的布喇格光栅或者波分复用器所用的体光栅等。相控阵或阵列波导光栅(AWG)都已证明是特别通用的组件,它们适用于复用器/解复用器、路由器等多种用途,或被用作波长选择发射机的组件。最后,铌酸锂( $\text{LiNbO}_3$ )声光滤波器也是非常通用的,它可被随意地用作复用或解复用的信道的任意组合,只是要以提高功耗为代价。

通常需要用光开关来作保护开关,使网络在各种故障情况下仍能生存。对于简单的点到点的光学连接,光网中的信道路由是至关重要的。同时满足多种指标要求的开关显得尤为重要,这些指标要求包括低串扰、低插损、低开关损耗,而且对于某些应用来说,还需要有很高的开关速度。我们能够根据不同的原理制造出多种光开关,但是没有一种能够对于多数参数都显示出最佳(或接近最佳)的性能。机械开关对于串扰有很高的衰减并有很低的插损,但开关速度中等。它们特别适用于信道切换,所以被广泛应用于今天的光通信系统中。因此机械开关就构成了第 8 章的主要部分。而其他类型的开关仍然仅是研究课题,尤其是那些能以足够快的速度切换光束的开关,它们将会极大地提高因特网的路由能力,但它们仅仅占很小的篇幅。在第 8 章的最后论述了另一类用在高比特率发射机中的铌酸锂开关(或调制器)。

第 9 章论述了全光时分复用(OTDM)技术,它对于甚大容量的光传输系统的研究与开发是必不可少的。这一章的重点放在关键技术上,包括超短脉冲产生、全光复用/解复用、光时基(时钟)的提取以及光脉冲波形测量等。它们应用于全光 TDM 和 TDM/WDM 传输系统并且特别注重将传输能力扩大到 Tb/s 数量级。

光通信的发展应该归功于有关方面的快速发展,其中不仅是

光纤的巨大传输容量,而且还有器件性能的提高及沿光纤传播的光信号的检测与变换等诸方面,因此本书的最后两章(第 10 章、11 章)专述光电组件的制造、模拟以及光电集成电路。集成化概念已经使硅工艺实现了巨大的进展并取得了很大的成就,而通常光电组件都包括结构很不相同的部件,因此集成化的概念就不能简单地适合于光电器件。所以开发混合光电组件以及开发单片光电集成器件是相近并互补的两回事,而且这两者都将按它们自己的规律进一步发展。

在本书中还包括了基本原理和对实际状态的观察,这些在本书的各章结论中已有论述。

**Herbert Venghaus**

**Norbert Grote**

2000 年 6 月于柏林

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| <b>第 1 章 光通信网络的特点</b> ..... | 1  |
| 1.1 光网的特点 .....             | 1  |
| 1.2 长途网络 .....              | 3  |
| 1.3 波分复用(WDM)网络 .....       | 4  |
| 1.4 网络结构 .....              | 7  |
| 1.5 光网保护.....               | 10 |
| 1.5.1 保护方案 .....            | 10 |
| 1.5.2 环形保护 .....            | 12 |
| 1.6 光网元.....                | 14 |
| 1.6.1 光 WDM 终端复用器.....      | 14 |
| 1.6.2 光 WDM 分插复接器.....      | 16 |
| 1.6.3 光 WDM 交叉连接 .....      | 19 |
| 参考文献 .....                  | 21 |
| <b>第 2 章 光纤</b> .....       | 24 |
| 2.1 引言.....                 | 24 |
| 2.2 波导特性.....               | 25 |
| 2.2.1 基本概念与参数 .....         | 25 |
| 2.2.2 阶跃折射率光纤的基本方程式 .....   | 31 |
| 2.2.3 渐变折射率光纤 .....         | 41 |
| 2.3 光纤材料.....               | 44 |
| 2.3.1 硅酸盐玻璃 .....           | 44 |
| 2.3.2 塑料.....               | 45 |
| 2.4 基本光学特性.....             | 46 |
| 2.4.1 损耗 .....              | 46 |

|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| 2.4.2 色散·····                 | 49        |
| 2.4.3 偏振·····                 | 54        |
| 2.5 非线性光学特性·····              | 56        |
| 2.5.1 受激散射过程·····             | 57        |
| 2.5.2 三阶非线性参数过程·····          | 63        |
| 2.5.3 光敏性·····                | 67        |
| 2.6 光纤中的脉冲传播·····             | 69        |
| 2.6.1 脉冲包络波动方程的推导·····        | 69        |
| 2.6.2 包络波动方程的解:孤子·····        | 72        |
| 参考文献·····                     | 74        |
| <b>第3章 发射机</b> ·····          | <b>77</b> |
| 3.1 引言·····                   | 77        |
| 3.2 理论·····                   | 79        |
| 3.2.1 单模运行的速率方程·····          | 79        |
| 3.2.2 材料性能·····               | 83        |
| 3.2.3 稳态特性·····               | 90        |
| 3.2.4 小信号调制特性·····            | 92        |
| 3.2.5 噪声特性·····               | 96        |
| 3.3 半导体激光器的基本结构设计·····        | 99        |
| 3.4 单模激光器结构·····              | 102       |
| 3.4.1 耦合模理论·····              | 105       |
| 3.4.2 折射率耦合 DFB 激光器的基本性能····· | 107       |
| 3.4.3 改进的 DFB 激光器结构·····      | 111       |
| 3.4.4 增益耦合式激光器·····           | 112       |
| 3.4.5 DFB 激光器的模拟·····         | 112       |
| 3.5 可调谐激光器·····               | 120       |
| 3.5.1 外腔激光器(ECL)·····         | 120       |
| 3.5.2 热调谐·····                | 120       |
| 3.5.3 多区域 DFB 激光器·····        | 120       |
| 3.5.4 分布布喇格反射 DBR 激光器·····    | 121       |

|                                          |            |
|------------------------------------------|------------|
| 3.5.5 可调式双波导激光器(TTG)                     | 121        |
| 3.5.6 平行耦合激光器(CCL)                       | 122        |
| 3.5.7 Y形激光器                              | 123        |
| 3.5.8 超结构光栅 DBR 激光器或取样光栅激光器<br>(SSG 激光器) | 123        |
| 3.5.9 弯曲波导 DFB 激光器(BWL)                  | 124        |
| 参考文献                                     | 124        |
| <b>第4章 光电探测器</b>                         | <b>127</b> |
| 4.1 引言                                   | 127        |
| 4.2 PIN 光电二极管                            | 127        |
| 4.2.1 PIN 光电二极管的原理                       | 128        |
| 4.2.2 PIN 光电二极管特性                        | 129        |
| 4.2.3 边入射 PIN 光电二极管                      | 138        |
| 4.2.4 金属—半导体—金属光电二极管                     | 140        |
| 4.3 雪崩光电二极管(APD)                         | 142        |
| 4.3.1 APD 的特性                            | 143        |
| 4.3.2 APD 的噪声                            | 144        |
| 4.3.3 改进噪声特性的结构                          | 146        |
| 4.4 光电二极管                                | 147        |
| 4.4.1 硅光电二极管                             | 147        |
| 4.4.2 铟镓砷(InGaAs)光电二极管                   | 149        |
| 4.5 光接收机                                 | 153        |
| 4.5.1 传统光接收机                             | 153        |
| 4.5.2 特殊光接收机                             | 156        |
| 4.5.3 光电集成电路(OEIC)光接收机                   | 157        |
| 4.6 结论                                   | 160        |
| 参考文献                                     | 160        |
| <b>第5章 光放大器</b>                          | <b>164</b> |
| 5.1 引言                                   | 164        |
| 5.2 光纤放大器                                | 165        |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 5.2.1 掺铒光纤放大器 .....            | 165        |
| 5.2.2 其他光纤放大器 .....            | 188        |
| 5.3 半导体光放大器 .....              | 189        |
| 5.3.1 化合物半导体材料中的光增益 .....      | 189        |
| 5.3.2 异质结器件基本结构 .....          | 191        |
| 5.3.3 速率方程、饱和特性、噪声指数 .....     | 194        |
| 5.3.4 光反射效应(增益抖动) .....        | 198        |
| 5.3.5 增益钳位 .....               | 199        |
| 5.3.6 半导体光放大器在通信系统中的一般应用 ..... | 201        |
| 5.3.7 数字传输系统 .....             | 201        |
| 5.3.8 波分复用系统 .....             | 205        |
| 5.3.9 模拟传输系统 .....             | 205        |
| 5.3.10 其他应用 .....              | 207        |
| 参考文献 .....                     | 208        |
| <b>第6章 无源与有源玻璃集成光学器件</b> ..... | <b>214</b> |
| 6.1 引言 .....                   | 214        |
| 6.2 无源功率分波器 .....              | 216        |
| 6.2.1 分波器及其基本功能 .....          | 216        |
| 6.2.2 波导模计算 .....              | 218        |
| 6.2.3 锥形结构和分支结构 .....          | 226        |
| 6.2.4 弯曲波导 .....               | 228        |
| 6.2.5 $2 \times 2$ 分束器 .....   | 229        |
| 6.2.6 $P \times N$ 星形耦合器 ..... | 231        |
| 6.2.7 玻璃中的离子交换 .....           | 232        |
| 6.2.8 特征方法 .....               | 236        |
| 6.2.9 商业器件的性能与可靠性 .....        | 241        |
| 6.3 集成光学铽/铒玻璃放大器 .....         | 244        |
| 6.3.1 引言 .....                 | 244        |
| 6.3.2 铽/铒共掺杂速率方程 .....         | 246        |
| 6.3.3 传输方程 .....               | 248        |

|              |                  |            |
|--------------|------------------|------------|
| 6.3.4        | 功率传递方程           | 249        |
| 6.3.5        | 铽钇共掺杂增强粒子数反转     | 252        |
| 6.3.6        | 有效反转系数           | 255        |
| 6.3.7        | 共掺杂波导区的增益        | 257        |
| 6.3.8        | 高浓度稀土元素的不利效应     | 261        |
| 6.3.9        | 工艺与器件            | 266        |
| 6.4          | 集成光学铽/铽玻璃激光振荡器   | 273        |
| 6.4.1        | 连续波(CW)运行        | 274        |
| 6.4.2        | 实验孤子与 Q 开关运行     | 279        |
|              | 参考文献             | 281        |
| <b>第 7 章</b> | <b>波长选择器件</b>    | <b>285</b> |
| 7.1          | 引言               | 285        |
| 7.2          | 器件规范             | 289        |
| 7.3          | 法布里—珀罗干涉仪滤波器     | 290        |
| 7.4          | 介质干涉滤波器          | 296        |
| 7.5          | 光纤光栅             | 298        |
| 7.6          | 基于光栅的解复用器        | 300        |
| 7.7          | 基于相阵列(PHASAR)的器件 | 307        |
| 7.7.1        | 引言               | 307        |
| 7.7.2        | 工作原理             | 307        |
| 7.7.3        | 工艺技术             | 309        |
| 7.7.4        | 器件特性             | 310        |
| 7.7.5        | 波长路由特性           | 316        |
| 7.7.6        | 多波长发射机与接收机       | 317        |
| 7.7.7        | 多波长分插复用器与交叉连接器   | 319        |
| 7.8          | 铌酸锂集成声光器件        | 323        |
| 7.8.1        | 引言               | 323        |
| 7.8.2        | 基本结构单元           | 324        |
| 7.8.3        | 可调波长滤波器          | 328        |
| 7.8.4        | 波长选择开关与分插复用器     | 331        |

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| 7.8.5 在 WDM 系统中的应用 .....                    | 333 |
| 7.8.6 展望 .....                              | 335 |
| 参考文献 .....                                  | 336 |
| <b>第 8 章 光开关</b> .....                      | 341 |
| 8.1 引言 .....                                | 341 |
| 8.2 应用 .....                                | 342 |
| 8.2.1 光组件特性与测试 .....                        | 342 |
| 8.2.2 测试方法 .....                            | 344 |
| 8.2.3 通信 .....                              | 345 |
| 8.3 技术 .....                                | 350 |
| 8.3.1 非干涉仪型开关 .....                         | 352 |
| 8.3.2 干涉仪型开关 .....                          | 362 |
| 8.4 总结 .....                                | 366 |
| 参考文献 .....                                  | 367 |
| <b>第 9 章 全光时分复用技术</b> .....                 | 368 |
| 9.1 全光 TDM 技术的作用 .....                      | 368 |
| 9.2 全光 TDM 系统的关键技术 .....                    | 370 |
| 9.2.1 超短光脉冲产生技术 .....                       | 370 |
| 9.2.2 全光型的复用器与解复用器(MUX/DEMUX)技术 .....       | 377 |
| 9.2.3 光时钟提取技术 .....                         | 389 |
| 9.2.4 高速光波形测量 .....                         | 393 |
| 9.3 OTDM 与 OTDM/WDM 传输的验证 .....             | 396 |
| 9.3.1 100Gb/s~400Gb/s 的 OTDM 传输实验 .....     | 397 |
| 9.3.2 400Gb/s 到 3Tb/s 的 OTDM/WDM 传输实验 ..... | 401 |
| 参考文献 .....                                  | 404 |
| <b>第 10 章 光混合集成电路</b> .....                 | 411 |
| 10.1 引言 .....                               | 411 |
| 10.2 混合集成的关键技术 .....                        | 413 |
| 10.2.1 混合集成的平台 .....                        | 413 |
| 10.2.2 无源对准技术 .....                         | 417 |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 10.2.3 用于混合集成的光电器件技术 .....  | 421        |
| 10.3 混合集成对光通信技术的影响 .....    | 425        |
| 10.3.1 混合集成技术的应用 .....      | 425        |
| 10.3.2 用于光纤终端用户系统的光模块 ..... | 426        |
| 10.3.3 用于 WDM 的光模块 .....    | 432        |
| 10.3.4 高速应用领域的光电混合模块 .....  | 438        |
| 10.4 展望 .....               | 446        |
| 10.5 总结 .....               | 448        |
| 参考文献 .....                  | 449        |
| <b>第 11 章 单片集成</b> .....    | <b>452</b> |
| 11.1 引言 .....               | 452        |
| 11.2 波导 .....               | 454        |
| 11.3 集成模斑尺寸变换器 .....        | 457        |
| 11.4 单片集成激光器 .....          | 460        |
| 11.4.1 垂直激光器—波导耦合 .....     | 460        |
| 11.4.2 激光—波导对接耦合 .....      | 462        |
| 11.4.3 激光器—HBT 集成 .....     | 466        |
| 11.5 集成接收机 .....            | 467        |
| 11.6 串扰 .....               | 472        |
| 11.6.1 电串扰 .....            | 472        |
| 11.6.2 光串扰 .....            | 475        |
| 11.6.3 热串扰 .....            | 475        |
| 11.7 光电集成化的流行态势 .....       | 476        |
| 11.8 展望 .....               | 482        |
| 参考文献 .....                  | 484        |
| <b>作者介绍</b> .....           | <b>489</b> |
| <b>缩写词表</b> .....           | <b>499</b> |