

“十二五”国家重点图书出版规划项目

光学与光子学丛书

III-V族光电探测器 及其在光纤通信中的应用

白成林 范鑫烨 房文敬 王欢欢 著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

光学与光子学丛书

III-V 族光电探测器及其在光纤通信中的应用

白成林 范鑫烨 著
房文敬 王欢欢

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书全面阐述了III-V族光电探测器的基本理论、制备工艺、主要性能特点及未来发展趋势,并详细讲述了III-V族光电探测器在光纤通信中的应用。全书共8章,具体内容为:光纤通信网概述、半导体物理基础、III-V族光电探测器、III-V族光电探测器制备工艺、基于III-V族光电探测器的解复用光接收器件、高性能III-V族光电探测器、高性能III-V族光电探测器的应用以及III-V族光电探测器的未来发展趋势等。

本书可供高等院校、科研院所光信息科学与技术、光电信息工程、光电子技术等专业的高年级本科生和光学类、信息类、通信类等研究生作为必修课或选修课教材,对上述领域内从事研究、开发、生产的工程技术及研究人员也有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

III-V族光电探测器及其在光纤通信中的应用/白成林等著. —北京:科学出版社, 2016.12

(光学与光子学丛书)

ISBN 978-7-03-051136-2

I. ① III… II. ①白… III. ①光电探测器-应用-光纤通信 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第312672号

责任编辑:钱 俊 / 责任校对:张凤琴
责任印制:张 伟 / 封面设计:铭轩堂设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年1月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年1月第一次印刷 印张:9 3/4

字数:181 000

定价:68.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

本丛书名由中国科学院院士母国光先生题写

光学与光子学丛书

《光学与光子学丛书》编委会

主 编 周炳琨

副主编 郭光灿 龚旗煌 朱健强

编 委 (按姓氏拼音排序):

陈家璧 高志山 贺安之 姜会林 李淳飞

廖宁放 刘 旭 刘智深 陆 卫 吕乃光

吕志伟 梅 霆 倪国强 饶瑞中 宋菲君

苏显渝 孙雨南 魏志义 相里斌 徐 雷

宣 丽 杨怀江 杨坤涛 郁道银 袁小聪

张存林 张书练 张卫平 张雨东 赵 卫

赵建林 朱晓农

丛 书 序

长期以来，我一直想组织同行出一套适合于光学、光学工程工作者和研究人员需求的光学与光子学的丛书。如今，在科学出版社同志们的努力推进和工作在光学和光子学科研、教学一线的广大专家们的大力支持下，这样一个愿望终于得以实现，这使我感到由衷的欣慰和喜悦，我深信这样一套丛书的出版必将有效地促进我国光学、光电子以及光学工程技术的创新发展。

当今世界科学技术发展日新月异。科技创新能力已成为一个地区、一个国家，尤其是一个大国经济和社会发展的核心竞争力。在众多纷繁的科技领域中，光学与光子学的发展直接影响到其他诸多学科领域的发展及其可能取得的成就。不但物理学、化学、生命科学、天文学等基础科学的发展离不开光学与光子学，对现代人类生活和人类生活影响甚大的一些技术科学如照明、通信、洁净能源、遥感、显示、环境监测、国防和空间开发、医疗与诊断、先进制造等都需要光学与光子学的知识。光学与光子学是渗透到各个学科领域内的前沿科学，光学与光子学涉及到几乎所有技术前沿的核心技术。中华民族要真正走向繁荣昌盛离不开对光的驾驭。

编委会把丛书的名称定为《光学与光子学丛书》，是想以此既包含经典光学(classical optics)的精华，也容纳现代光学(modern optics)即光子学(photronics)的最新研究进展。我和所有编委们一同期待着这套丛书能够在涉及光科学和光学技术知识的深度和广度上都达到一个崭新的高度。积跬步至千里，汇小溪成江河。改革开放三十年的成就使得我国的光学事业处在了一个新的起点上。让我们大家共同努力，以此套高质量、高水准的《光学与光子学丛书》作为对中国光学事业大发展的鼎力贡献。

母国光

2011年1月

前 言

光电子学的发展最早始于 1887 年,赫兹(Hertz)在这一年发现了光电效应,爱因斯坦(Einstein)于 1905 年对其成功地进行了解释。1945 年,希尔(Hill)等发明了真空光电管,后又发明了光电倍增管,这就是最早的光电管和光电器件。1969 年,米勒(Miller)等提出了集成光学的概念,立刻引起了科学界的诸多关注,集成光学的出现是信息光学发展中里程碑式的变革。光电集成技术到目前已经发展了三十余年,在几何光学以及经典电磁场理论的基础上,制备了激光器、光开关、光探测器等简单的光电集成器件以及光发射机、光接收机、光调制器等大规模光电集成芯片,应用于诸多技术领域,这些技术领域涉及了光纤通信技术、光纤传感技术、光纤通信与计算机结合的网络技术、光存储技术等。

伴随着对光纤通信传输容量需求的与日俱增,光纤通信系统对光电集成器件的可靠性、集成度、灵敏度、响应速率以及生产成本等提出了更高的要求。解复用光接收集成器件作为光电集成器件中的一员,对波分复用(WDM)光网络具有十分重要的作用。对于 WDM 系统中的解复用光接收器件而言,能够精确探测各个信道波长光信号是极其重要的。然而在实际光通信系统中,激光器的不稳定和光信号在传输过程中受到的外界干扰等因素,都会引起光信号的波长漂移。如果此时在光通信接收端的光探测器的响应谱是尖峰状的,那么由光信号的漂移所带来的影响就会非常严重——光探测器对光信号的探测性能急剧下降。为了解决光信号波长漂移的问题,提高光探测器的容错性,就需要设计高性能、高可靠性的光探测器来满足光纤通信网络的需要,这具有重要的现实意义。

本书的有关工作得到国家自然科学基金(项目编号:60778017、61205065、61501214)、信息光子学与光通信国家重点实验室开放基金(项目编号:IPOC2015B009)、山东省自然科学基金项目(项目编号:ZR2014AM018、ZR2015FQ008)、企业横向课题(项目编号:2014GJH04)等资助,在此一并表示衷心的感谢。

本书是一本全面阐述Ⅲ-V族光电探测器基本理论、制备工艺、主要性能特点及其在光纤通信中应用实例的专著。作者在半导体物理、光器件、光纤通信网络等领域开展了相关研究并阅读了大量相关领域的文献书籍,在此基础上,总结自己多年从事半导体光电器件研究和教学工作的实践经验,结合我国半导体光电



Ⅲ-V族光电探测器及其在光纤通信中的应用

器件现状写了本书，力求做到内容新颖，同时具有实用价值。由于水平有限，加之Ⅲ-V族光电探测器技术日新月异、发展迅速，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者

2016年7月

目 录

前言

第 1 章 光纤通信网概述	1
1.1 光纤通信网发展概述	1
1.2 光纤通信网的特点及架构	3
1.2.1 光纤通信网的特点	3
1.2.2 光纤通信网的架构	4
1.3 波分复用系统	7
1.3.1 波分复用系统的基本概念及特点	7
1.3.2 波分复用系统的构成	7
1.3.3 波分复用系统的波分复用器件和应用	8
参考文献	9
第 2 章 半导体物理基础	10
2.1 材料类型	10
2.1.1 半导体材料	10
2.1.2 其他材料	11
2.2 材料特征	13
2.2.1 折射率	13
2.2.2 工作波长	14
2.2.3 非线性效应	15
2.2.4 偏振效应	16
2.3 半导体理论基础	17
2.3.1 能带理论	17
2.3.2 能级跃迁和辐射	19
2.3.3 粒子数反转	21
2.3.4 掺杂作用	22
2.3.5 PN 结	23

参考文献	24
第 3 章 III-V 族光电探测器	26
3.1 光电探测器简介	26
3.1.1 光接收机	26
3.1.2 光电探测器（光电检测器）	28
3.2 新型光电探测器的分类	30
3.2.1 单行载流子光电探测器	30
3.2.2 波导型光探测器	31
3.2.3 双吸收层型光探测器	32
3.3 光电探测器的工作特性	33
3.3.1 量子效率与响应度	33
3.3.2 响应速度	35
3.3.3 暗电流	36
3.3.4 线性响应度	36
3.3.5 噪声特性	37
参考文献	39
第 4 章 III-V 族光电探测器制备工艺	40
4.1 晶体的生长和外延	40
4.1.1 晶体的生长	40
4.1.2 外延生长技术	42
4.1.3 外延层的结构和存在问题	43
4.2 薄膜淀积	44
4.2.1 热氧化	44
4.2.2 射频溅射实现金属化	45
4.3 基于光刻与刻蚀的平面加工	46
4.3.1 光学曝光技术	46
4.3.2 电子束曝光技术	48
4.3.3 刻蚀技术	49
4.3.4 模型加工技术	51
参考文献	53

第 5 章 基于Ⅲ-V 族光电探测器的解复用光接收器件	54
5.1 光电集成技术的发展及其在解复用光接收器件中的应用	54
5.2 波分复用系统中的光波分解复用器	58
5.2.1 TFF 型解复用器	58
5.2.2 AWG 型解复用器	60
5.2.3 FBG 型解复用器	61
5.3 波分复用系统解复用光接收器件	62
5.3.1 波导型光探测器	63
5.3.2 基于 F-P 滤波腔的光探测器	65
5.3.3 谐振腔增强型光探测器	66
参考文献	67
第 6 章 高性能Ⅲ-V 族光电探测器	70
6.1 基于垂直楔形吸收腔的 Si 基长波长解复用光接收器件	71
6.1.1 器件的基本结构	71
6.1.2 理论计算与特性分析	71
6.1.3 器件的外延生长和制备	75
6.1.4 器件的测试和分析	79
6.2 基于锥形吸收腔的 Si 基长波长解复用光接收器件	81
6.2.1 基本结构与理论仿真	82
6.2.2 圆锥形微结构的制作工艺	87
6.2.3 器件的外延生长与制备	88
6.2.4 器件的测试和分析	88
6.3 具有平顶陡边光谱响应的 Si 基长波长集成解复用光探测器	90
6.3.1 具有平顶陡边响应特性的 Si 基长波长集成解复用光探测器的理论分析	94
6.3.2 基于 BCB 树脂的晶片键合技术	98
6.3.3 器件的外延生长和制备	100
6.3.4 器件的测试和分析	104
参考文献	106
第 7 章 高性能Ⅲ-V 族光电探测器的应用	110
7.1 接入光网络	110
7.1.1 网络特点	110



III-V族光电探测器及其在光纤通信中的应用

7.1.2	关键技术	111
7.1.3	实例分析	116
7.2	动态可重构光网络	122
7.2.1	网络特点	122
7.2.2	关键技术	122
7.2.3	实例分析	124
7.3	相干光网络	126
7.3.1	网络特点	126
7.3.2	关键技术	127
7.3.3	实例分析	129
	参考文献	130

第8章 III-V族光电探测器的未来发展趋势

8.1	光电探测器的展望	131
8.2	新器件与新技术	132
8.2.1	单行载流子光探测器	133
8.2.2	基于微纳结构集成的III-V族光探测器	135
8.2.3	聚焦离子束加工技术	138
8.2.4	软光刻加工技术	139
	参考文献	140

第 1 章

光纤通信网概述

1.1 光纤通信网发展概述

在我们生活的方方面面，信息的交流无处不在，追随着发展的脚步，我们一起来了解通信^[1-6]。通信是信息的双方或多方通过任意介质，将信息从发送方准确安全地传送到接收方。通信系统是信息传输过程（从信源经信道传到信宿）的全部技术系统的总称。光纤通信系统是以光为载频，利用玻璃、石英、塑料等材料在高温下拉制而成的光导纤维（简称“光纤”）作为传输媒介，通过光电转换，用光来传输信息的通信系统。

在 21 世纪信息化时代的浪潮中，光纤通信已经成为现代社会不可缺少的通信系统，下面我们回顾光纤通信的发展历程，如图 1-1 所示。



图 1-1 光纤通信的发展史

使用光进行信息传递的例子有很多,在 3000 多年前,人们利用烽火台传递消息以及现在使用的旗语、信号灯都是光通信的原始形式,这些光通信的共同缺点都是传输容量、距离有限。

1880 年,通过不断的探索,贝尔(Bell)发明了光电话,他利用太阳光作光源,大气为传出介质,用硒晶体作为光接收器件,成功地进行了光电话的实验,通话距离最远达到了可见光的数百米,实现光通信。但是太阳光及其他可见光的频率不稳定、单一,不适合作为光源,大气作为传输介质,损耗大,易受天气影响,故这种光通信一直未得到发展。

1960 年,美国的梅曼(Maiman)研制出红宝石激光器和氦氖激光器,使得光通信找到了合适的光源,它具有方向性好、能量集中的特点。1962 年,半导体激光器(LD)诞生,极大地推动了光通信技术的发展,随后在 1966 年,高锟(C. K. Kao)和霍克哈姆(C. A. Hockham)发表了关于光纤通信的传输介质的论文,指出了利用光纤进行信息传输的可能性和技术途径,奠定了现在光通信的基础。

1970 年,美国康宁公司就研制出衰减小于 20dB/km 的阶跃折射率多模光纤,与此同时,贝尔实验室研制出在室温下工作的双异质结构 LD,工作波长是 850nm,这使得光纤通信系统的研究条件得以具备(把 1970 年称为光纤通信的元年)。

1972 年,美国康宁公司研制的高纯石英多模光纤使得损耗降低到 4dB/km,使光纤通信系统进一步发展。1973~1976 年,通过不断的研究,光纤的损耗在波长 1.2 μ m 处降低到 0.47dB/km。与此同时,新的光纤低损窗口 1310nm 和 1550nm 被找到,这两个长波长的波长段的损耗可以降低到 0.5dB/km 和 0.2dB/km 以下。由于单模光纤可以获得较大的传输带宽和减少光纤色散,光纤通信也开始由 850nm 的多模光纤通信系统向 1310nm 和 1550nm 的单模光纤通信系统转变,在这一阶段光纤通信得到迅猛的发展。

20 世纪 90 年代,掺铒光纤放大器(EDFA)问世,并以其增益高、噪声小、带宽宽、偏振无关等优势在光纤通信中得到广泛应用,同时带动了波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)系统技术的发展。

随着现代技术的不断完善,光纤通信不断地由短波长波段向长波长波段发展,由低速度向超高速发展,由多模光纤向单模光纤发展,由小容量向超大容量 WDM 系统发展,由相对短距离向超长距离发展。

到目前为止,光纤通信的发展大致经历了五代,第一代光纤通信系统是工作在 850nm 波长的多模光纤,损耗达到 4dB/km,光源采用 GaAlAs 半导体激光器和发光二极管(LED),光电检测器为 Si 材料的光电二极管(PD)和雪崩光电二极管(APD),传输中继距离达到数千米。第二代光纤通信系统是工作在 1310nm

波长的多模光纤, 光纤损耗达到 0.5dB/km , 光源使用 InGaAsP 材料的半导体激光器, 光电检测器采用 Ge 材料的 APD, 此时的传输中继距离达到几十千米。第三代光纤通信系统是工作在 1550nm 波长的单模光纤, 光纤损耗小于 0.2dB/km , 色散可达到零, 光源采用 InGaAsP 材料的半导体激光器, 光电检测器采用 Ge 材料的 APD, 传输中继距离达到 100km 。第四代光纤通信系统采用 EDFA 和密集波分复用 (DWDM) 技术, 使得传输容量变大, 中继距离变长, 色散更小。第五代光纤通信系统正朝着超大容量、超长中继距离、超高速的方向发展, 使得光纤到户 (FTTH) 惠及每户人家。

光纤通信作为世界上发展最迅速的技术之一^[2], 紧跟科技的发展脚步。我国在 1974 年就开始了光纤通信的研究, 并在短期内取得了不错的研究成果。20 世纪 70 年代, 我国成功研制出第一根光纤, 为光纤通信的发展奠定了基础。20 世纪 80 年代中期, 我国生产的光纤开始商用化, 在这几年里, 建立了完整的光纤试验生产线, 同时引进了国外先进的光纤光缆生产线, 光纤通信实用化得到进一步发展。20 世纪 90 年代, 光隔离器在我国率先规模化生产, 中国吉通、联通、网通成立, 国产第一套 PHD 传输网正式投入使用, 光缆代替电缆, 光纤通信系统开始大规模建设, 1999 年我国生产的 $8\times 2.5\text{Gbit/s}$ WDM 系统在青岛和大连开通, 光纤通信的发展渐入佳境。随着光通信技术的不断提高, 2003 年我国 FTTH 革命拉开序幕, 经过 10 年左右的发展, 到 2014 年, FTTP 用户数量急剧增加, 光纤通信得到迅猛发展。此外, 我国凭借先进技术生产的一些光器件可以与国际市场的产品相媲美。总而言之, 中国的光纤通信技术与国际先进水平相差不大。

1.2 光纤通信网的特点及架构

1.2.1 光纤通信网的特点

相比其他通信方式, 光纤通信具有以下突出的优点^[1, 3, 6-11]。

(1) 光波频率高, 传输频带宽, 以及超大容量传输。在光纤传输过程中, 载波频率越高, 频带宽度越宽, 则传输容量越大, 比如以前我们所使用的电缆通信, 以电波为载频, 在波长为 $0.1\text{m}\sim 1\text{mm}$ 的范围内频率为 $3\sim 300\text{GHz}$, 而光纤通信以光波为载频, 采用近红外光波长 $1\mu\text{m}$ 的频率达到 300THz 以上, 比电波频率高 3 个数量级以上, 故传输容量比以往高出数千倍, 也就是说, 一根光纤的带宽可以达到 100GB , 可传输 100000 多路电话信号, 比电缆通信传输多了上百倍。

(2) 光纤传输损耗小, 无中继距离长。光纤在传输的过程中, 由于材料本身



的吸收、散射等原因,随着传输距离的增加,光功率不断下降,光纤对光波产生衰减,影响传输的中继距离。随着光纤技术的发展,发现了三个低损窗口,分别是短波长(850nm)、长波长(1310nm、1550nm),目前光纤通信大多使用波长为1550nm的单模光纤,传输损耗低于0.2dB/km,无中继距离达到200km以上,广泛用于长距离大容量光纤通信。

(3) 不受电磁干扰,保密性强,传输质量高。由于光纤制作材料是非金属,光波频率比较高,相比于传统的电缆通信(易受电磁干扰),光纤即使工作在强电磁场环境下也不会受到干扰。信息在光纤中传输,不会溢出光纤,故传输过程中不会出现光纤之间的串扰,保密性好,保证了光纤传输信息的质量。

(4) 耐高温高压及化学腐蚀。光纤是由玻璃、石英、塑料等材料拉制而成,化学性质稳定,国际上主流的耐高温光纤主要有耐高温丙烯酸树脂涂层光纤、有机硅胶涂层光纤、聚酰亚胺涂层光纤以及金属涂覆光纤四种,广泛地应用于油气井探测、航空航天等领域,由于光纤抗化学腐蚀,受潮不会影响光信息的传递,可将光纤做成光缆埋藏在地下。

(5) 原材料丰富,体积小,重量轻,便于施工和维护。光纤所用的主要原料是二氧化硅,总量约占地壳质量的12%,原材料极其丰富、价格相对便宜,制作出的光纤直径几微米,目前国际上已经有包含1000多根光纤的光缆,直径才28mm,小巧轻便,便于施工和架构。

1.2.2 光纤通信网的架构

全光通信^[12-14]是现在光纤通信网发展的主要方向,它是以光纤为传输介质的广域网、城域网以及大范围的局域网,在整个网络中全部以光的形式进行传输,中间不需要光/电/光(O/E/O)转换,进一步提高了整个网络的传输容量和交换/选路的光节点吞吐量。下面简单地介绍目前主流的技术:光传送网技术、自动交换光网络技术^[12]、光接入网络技术等。

1. 光传送网

光传送网(optical transport network, OTN),指在光域内实现客户层业务信号的各种功能,如传送、复用、路由选择、放大、监控,在光域上进行分插复用和交叉连接,并且保证其性能指标和生存性的传送网络,遵循其分层结构、信息定义、客户关系、网络拓扑、功能界定等。光传送网的层次结构自上而下依次为电路层(circuit layer)、电通道层(electrical path layer)、电复用段层、光信道层(OCH layer)、光复用段(OMS layer)层、光传输段层(OTS layer)和物理

层，如表 1-1 所示。

表 1-1 波分复用光网络（WDM optical network）的分层结构

波分复用 光网络	电路层
	电通道层
	电复用段层
	光信道层
	光复用段层
	光传输段层
	物理层

光传送网中最常用的光交叉连接（OXC）节点结构：基于空间光开关矩阵和波分复用、解复用器对的 OXC 结构，基于空间光开关矩阵和可调谐滤波器的 OXC 结构，支持部分虚波长通道的 OXC 结构，由点交叉连接矩阵实现的 OXC 节点结构等。

典型的光分插复用器（OADM）结构主要有：基于复用器、解复用器和光开关矩阵的 OADM 结构，基于阵列波导光栅的 OADM 结构，基于光纤光栅和光环行器的 OADM 等。

2. 自动交换光网络

随着光网络的迅速发展，人们不满足于当前的网络功能，提出了以控制为主、网元的智能化、面向业务能力更强的自动交换光网络（ASON），实现了网络资源分配的智能化。ASON 由四部分组成，分别是控制平面、管理平面、传送平面、数据平面，结构如图 1-2 所示。

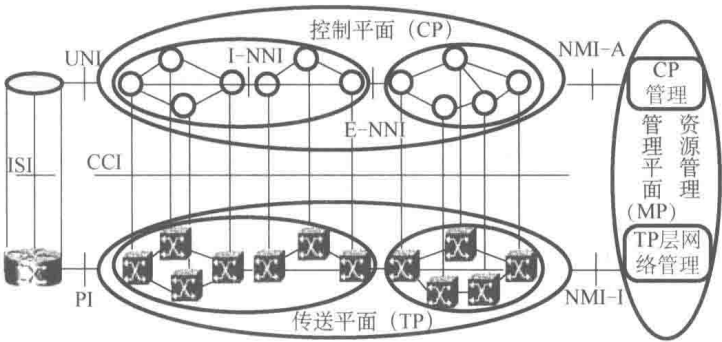


图 1-2 ASON 的体系结构

PI：物理接口；I-NNI：内部网络-网络接口；CCI：连接控制接口；NMI-T：网络管理接口 TUNI；UNI：用户网络接口；E-NNI：外部网络-网络接口；ISI：内部信令接口；NMI-A：网络管理接口 A

下面分别简单地介绍这几部分。

控制平面通过信令、接口完成建立和拆除连接的功能，并且能够及时地修复连接故障，完成呼叫和连接，是自动交换光网络的主要部分。

管理平面实现了对管理功能的智能化，完成对传输平面、控制平面和整个信令系统的管理。在对光传送网及网元设备管理的同时，将网络操作系统和网元联系在一起，形成更有效的通信方式。

传送平面是业务传送的实体，将信息从某位置传到另一位置的双向或单向传输，能够传送前面两个平面的信息，完成连接的建立、移除、交换选路和传送等。传送平面通过网元光节点可以实现高度的智能化。

数据平面贯穿于三大平面之中，主要用于承载控制信令消息和管理信息的信令网络。

此外，ASON 有三种结构：交换链接、永久链接、软永久链接，这里不再详细论述。

3. 光接入网

光纤接入网（OAN）^[13]是位于城域光网络接入层和用户之间并以光纤作为传输媒介，在接入网环境下实现用户信息传送的特殊网络形式。光纤接入网从技术上可分为两大类：有源光网络（AON）和无源光网络（PON），其中有源光网络又可分为基于 SDH 的 AON 和基于 PDH 的 AON；无源光网络可分为窄带 PON 和宽带 PON。图 1-3 是光纤接入网的结构模型。

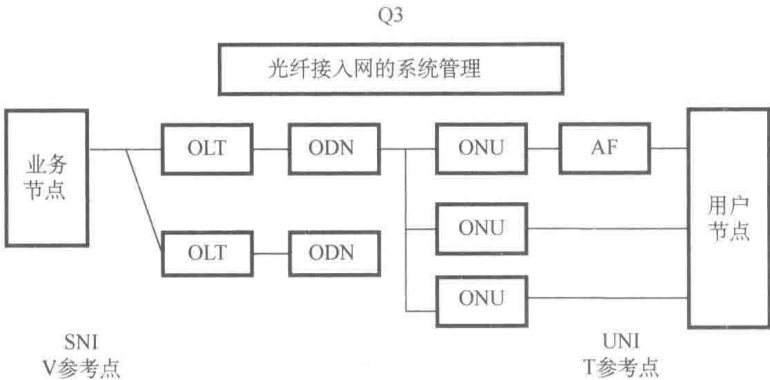


图 1-3 光纤接入网的结构模型

OLT：光线路终端；ONU：光网络单元；ODN：光分配网络；UNI：用户网络接口；SNI：业务节点接口；V：用户接入网与业务节点间的参数；T：用户网络接口参数点；Q3：网络参考点

从图中可以知道，光纤接入网是 SNI 和 UNI 之间的一些传输实体，主要由 OLT 和 ONU 组成，具有传输、复用和交叉连接等功能。