

序

人脑能够处理信息、语言、图画和文字是人类特有的文明。

当工业文明能够提供便利交通时，邮政通信迅速发展，逐步覆盖全球。同时，电报发明了，电话发明了，后来无线电也发明了，世界又有了一个电话网。

计算机是一项了不起的发明，起先是用于计算，后来发展成能处理各类信息，并且得到越来越广泛的应用。将单个的计算机互连成网是 20 世纪 60 年代的事。最近几年，因特网上的信息流量，以每 7 个月翻一番的速度在高速发展。迄今，因特网信息流量已超过电话网，全球用户数以亿计。

邮政网使人类文字的交流跨越空间和时间，电话网使得人类可以实时进行异地语言交流，而因特网更让全人类的各种各样的信息得以传递和共享。

图像技术有几项重要发明：照相、电影和电视。现在图像技术是数字化的。目前，标准数字电视的图像大约 40 万像素，信息量约 160Mb/s。高清晰度电视的标准是每幅图像约 200 万像素，信息量约 800Mb/s。超高清晰度的电视已经开始研究，每幅图像约 800 万像素，也有人称之为数字电影，因为它的图片质量可以与电影胶片相媲美。

正是因为这些高清晰度的电视、电影，再加上高级的交互式的网络游戏，我们需要宽带网络接入。

目前大多数连接因特网的速率是每秒几兆到 10 兆比特，采用光纤到户技术和无源光网络技术。用户接入因特网的速度可以达到百兆比特每秒，甚至千兆比特每秒。大多数专家预期，现在的电视、电话、数据三种传递功能将统一由这样一个网络接入技术来完成。

十几年前，各国政治家们就意识到宽带网络的重要性。1991 年美国国会通过《高性能计算和通信》议案，提出建设国家信息基础设施计划。欧盟（前欧共体）于 1993 年提出欧洲信息社会计划，随后通过《欧洲电信标准化和信息社会》议案。1994 年亚太经济合作组织（APEC）宣布成员之间有效合作，促进并加速亚太信息设施（APII）的发展。稍后，中国提出以信息化带动工业化。最近，日本提出 U-Japan 计划，要建设一个网络“无处不在”的日本。一个全球范围的建设宽带网络的浪潮势不可挡。

正是在这样的社会发展背景下，甚短距离光传输技术应运而生。它是目前 10Gb/s 及其以上传输速率的高速互连领域中，直接面向应用而开发的一项新的光通信技术，是目前和今后的宽带网络的重要组成部分，是下一代全光通信网的一个重要环节。甚短距离光传输所采用的技术方案，如垂直腔面发射激光器

(VCSEL, Vertical Cavity Surface Emitting Laser)、硅基光探测器、新型多模光纤、粗波分复用等等是近几年光通信领域里的最新研究成果。这些成果的推广和应用将直接推动相关产品的高度集成化和低成本化,也将促进相关标准和规范的建立。

本书是从应用的角度出发,结合光电子领域中的重要器件——VCSEL,全面详细阐述甚短距离光传输系统。本书收集了国际上在这一领域的最新研究成果,并且也引入了作者相关工作。本书学术覆盖面较宽,不但涵盖了光纤通信系统、万兆以太网、光纤通道等系统技术,而且还重点阐述了以 VCSEL 为代表的有源和无源光电子器件的理论和实际应用,涉及到高速集成电路的制作和工艺,是一部有特色的学术专著,并有一定的广度和深度,对于国内光通信领域的研究学者有很大的参考价值。

作者陈弘达是我国知名的光电子学专家,左超在北京邮电大学光通信中心获得博士学位后,在中国科学院从事博士后研究工作。他们能在繁忙研究工作的同时,合作写成这样一本专著奉献给中国的光通信光电子事业,难能可贵。



2004年8月于北京邮电大学

前 言

甚短距离光传输 (VSR, Very Short Reach) 技术是 2000 年由美国 *Telecommunications* 杂志评选出的当年电信领域十大热门技术之一。所谓甚短距离是指最大连接长度不超过 600m (一般不超过 300m) 的范围, 在这一通信距离内, 所采用的光连接技术和电接口规范同传统的骨干网传输技术有很大的不同, 是光通信技术发展的一个全新领域。在构建下一代高速、大容量全光通信网络中, 由于光接口器件在网络系统中的应用数量巨大, 甚短距离光传输技术以其价格低和性能稳定的优势, 吸引了众多光电子器件和网络设备制造商的注意, 逐渐成为国际通用的标准技术, 是全光网的一个重要组成部分。

本书共分为 6 章。第一章首先介绍了甚短距离光传输技术的基本概念, 回顾了该技术的发展过程、研究现状和发展趋势, 并简要介绍了甚短距离光传输技术的核心器件——垂直腔面发射激光器 (VCSEL, Vertical Cavity Surface Emitting Laser) 的基本概念、构造、特点及其应用范围。

VCSEL 是光从垂直于半导体衬底表面方向出射的一种半导体激光器, 可以在垂直于衬底的方向上并行排列多个激光器, 非常适合应用在并行光传输等短距离传输领域。目前 VCSEL 已经成为短波长光通信领域的主导光源。随着技术和工艺水平的进步, 长波长的 VCSEL 逐渐成熟, 是最有竞争力的新一代光通信光源。在 VCSEL 诞生之前, 传统的边发射激光器是光通信的主要光源。实践证明, 经过多年的发展, 分布反馈 Bragg (DFB, Distributed Feedback Bragg) 激光器等半导体边发射激光器在工作特性以及应用领域方面仍存在一些不足。在短距离、甚短距离传输等大量应用光电子器件的场合, 采用边发射激光器使得系统整体成本过高。有鉴于此, 本书第二章, 详细阐述 VCSEL 的原理和工艺实现, 分析 VCSEL 的稳态特性、动态特性以及测量技术。

第三章参考光网络互连论坛 (OIF, Optical Internetworking Forum) 的相关标准, 介绍 10Gb/s 甚短距离光传输技术的基本功能结构。在 SDH/SONET 基本概念的基础上, 介绍面向 SDH/SONET 接口的并行 10Gb/s 甚短距离光传输方案的具体实现。由于 10Gb/s 的传输已经实用化, 在这一速率等级上如何实现骨干网和局域网的接口是甚短距离光传输技术的一个重要组成部分。在此基础上, 介绍 10Gb/s 规范的光电接口的主要性能指标, 读者可以充分了解甚短距离并行光传输技术的特点和技术要求。

甚短距离光传输技术虽然传输的距离较短, 但是却涵盖了光通信领域的方方面面, 非常有技术特色, 不仅可以采用单个 VCSEL 芯片作为光源, 而且其发射

和接收模块中还可以封装多个激光器芯片阵列和探测器阵列，构成一维、多维光源阵列；其传输介质趋向于采用新型的宽带多模光纤；为了进一步扩大容量，在多个窗口采用粗波分复用技术等。因此，第四章介绍甚短距离光传输涉及到的关键技术——光收发模块阵列、探测器及其阵列和传输介质等相关技术。

第五章重点介绍了 40Gb/s 甚短距离光连接的三种实现方案，以及其相关的光电接口规范。详细介绍 ATM 信元、IP 数据包等是如何通过系统数据包接口 (SPI, System Packet Interface) 在 VSR 系统中映射、传输的，以及时分复用交换接口 (TFI, TDM Fabric Interface) 和 SPI 接口同 VSR 光接口之间的连接是如何通过 SFI-5 实现的。

目前的高速网络技术正在向 10Gb/s 甚至是更高速率发展，例如万兆以太网、光纤通道等技术，这些技术都需要在较短距离内，通过光互连实现大容量信息的传送，其技术实现，特别是物理层和数据链路层的技术方案同甚短距离光传输技术密切相关。甚短距离光传输技术专门面向高速、大容量传输，是光通信领域内技术标准和成熟规范的结合，其性能指标恰当，可以集成在相关领域的设计方案中。第六章介绍了千兆、万兆以太网和光纤通道等需要在甚短距离范围内进行高速互连的网络技术，在阐述这些技术基本原理的基础上，介绍其涉及到的甚短距离光传输协议、具体实现等。可以预言，甚短距离光传输技术的实用化进程，必将使光通信技术以及相关的高速传输技术进入新的阶段。

本书的编写是课题组多年来科研成果的结晶，包含了毛陆虹、贾九春、申荣铉、高鹏、周毅、裴为华、孙增辉、唐君等同志的辛勤工作。本书的出版得到了国家自然科学基金研究成果专著出版基金（项目编号：60424407）的支持。本书的出版还得到了国家自然科学基金重大项目“半导体光子集成基础”子课题——“微腔 VCSEL 器件及模块研制”（项目编号：69896260）、国家 863 计划“30Gb/s 并行光发射模块的研制”（项目编号：2001AA312080）、“10Gb/s 甚短距离并行光传输模块与实验系统研究”（项目编号：2001AA122032）的支持，在此一并表示感谢。

甚短距离光传输技术是光通信领域的一个新课题，目前的各项国际和国家标准还没有充分完善，在本书的编写过程中，还有许多新技术和标准正在发展。本书从光通信系统和光电子器件应用的角度出发，总结了作者多年来对甚短距离光传输等相关技术的研究成果和经验，在突出基本概念、基本原理阐述的基础上，参照 ITU-T 和 OIF 等国际组织的最新标准和建议，力求深入浅出、通俗易懂，希望能够对光通信领域的科研工作者有所帮助。由于作者水平有限，尽管做了很大努力，书中难免有错误、遗漏和不当之处，敬请广大读者批评指正。

作者联系信箱：hdchen@red.semi.ac.cn。

作者

2004 年 7 月于北京

目 录

序

前言

第一章 概述	1
1.1 甚短距离光传输(VSR)技术	2
1.1.1 VSR 的定义和标准	2
1.1.2 VSR 在网络体系中的位置	3
1.1.3 VSR 技术的基本工作形式	4
1.1.4 VSR 技术的主要特点	5
1.1.5 VSR 技术的发展历史、研究现状和发展趋势	5
1.2 垂直腔面发射激光器(VCSEL)简介	6
1.2.1 VCSEL 的产生背景与发展过程	6
1.2.2 VCSEL 的主要特点	8
1.2.3 VCSEL 技术的应用范围	11
1.2.4 VCSEL 技术的发展前景	14
第二章 VCSEL 的原理和制作工艺	17
2.1 VCSEL 的设计与分析	17
2.1.1 VCSEL 的理论分析	17
2.1.2 VCSEL 的总体结构设计	22
2.1.3 VCSEL 中反射镜的设计	23
2.1.4 VCSEL 光腔的设计	28
2.2 VCSEL 的工艺及其制备	29
2.2.1 MBE 工艺	30
2.2.2 MOCVD 工艺	32
2.3 几种典型的 VCSEL 结构及其制作工艺	35
2.3.1 刻蚀空气柱型	36
2.3.2 离子注入型	36
2.3.3 再生长型	37
2.3.4 选择氧化型	38
2.4 VCSEL 的特性分析	39
2.4.1 VCSEL 的稳态特性分析	39
2.4.2 VCSEL 的动态特性	43

2.5	VCSEL 的中间测量技术	46
2.5.1	微区光反射谱测量法	46
2.5.2	VCSEL 的边发射测量	46
第三章	10Gb/s VSR 的基本功能结构	47
3.1	OIF-VSR 的接口和应用范围	47
3.1.1	OIF-VSR 的接口分类	47
3.1.2	OIF-VSR 的参考应用模型	48
3.2	VSR4 的主要规范和功能结构	50
3.2.1	VSR4-1.0 规范	50
3.2.2	VSR4-2.0 规范	51
3.2.3	VSR4-3.0 规范	52
3.2.4	VSR4-4.0 规范	53
3.2.5	VSR4-5.0 规范	53
3.3	VSR4-1.0 规范的功能实现	54
3.3.1	SDH/SONET 的一些基本概念	54
3.3.2	VSR4-1.0 规范的功能实现	55
3.4	VSR4-1.0 的主要性能指标	65
3.4.1	VSR4-1.0 的光接口规范	66
3.4.2	VSR 的电接口标准	69
3.4.3	SFI-4-1.0 接口标准	74
第四章	VSR 的关键技术	82
4.1	并行光发射和接收模块	82
4.1.1	驱动电路	83
4.1.2	耦合技术	87
4.1.3	封装技术	88
4.1.4	并行光发射和接收模块的技术参数	89
4.2	探测器技术	90
4.2.1	光吸收与光电探测器物理机理	91
4.2.2	光电探测器性能参数	92
4.2.3	PIN 光电二极管	94
4.2.4	基于标准 CMOS 工艺的集成光电探测器	98
4.2.5	定制 CMOS 工艺下的 PIN 光电探测器集成	104
4.2.6	标准工艺下硅基光电集成的应用	110
4.3	光纤传输技术	111
4.3.1	光纤的数值孔径	112
4.3.2	光纤模式	113

4.3.3	光纤的传输特性	114
4.3.4	光纤标准和技术指标	118
4.3.5	多模光纤的带宽	128
4.4	CWDM 技术	132
4.4.1	CWDM 的技术标准	133
4.4.2	CWDM 系统的关键技术	134
第五章	40Gb/s VSR 的基本功能结构和实现	139
5.1	VSR5 的电接口标准	140
5.1.1	SPI-5 接口	140
5.1.2	TFI-5 接口	149
5.1.3	SFI-5 接口	169
5.1.4	SxI-5 接口	177
5.2	VSR5 的基本功能结构和实现	180
5.2.1	40Gb/s VSR5 并行 12 路技术方案	181
5.2.2	VSR5 CWDM 4×10Gb/s 技术方案	191
5.2.3	串行光传输技术方案	199
第六章	应用甚短距离光传输的相关技术	204
6.1	高速以太网技术	204
6.1.1	以太网的主要技术分类	204
6.1.2	千兆以太网	207
6.1.3	万兆以太网	212
6.2	光纤通道技术	218
6.2.1	光纤通道的主要工作方式	218
6.2.2	光纤通道的分层结构	220
6.3	RapidIO 技术	222
6.3.1	RapidIO 的应用	222
6.3.2	RapidIO 的原理和组成	223
6.4	Infiniband 技术	226
6.4.1	Infiniband 的应用	226
6.4.2	Infiniband 的原理	227
	参考文献	229
	附录 缩略语英汉对照	232

第一章 概 述

20 世纪 80 年代以来，光通信系统从最初传送几公里、速率在每秒兆比特量级的准同步数字系列系统迅速发展到现在传送几千公里、速率超过每秒太比特量级的密集波分复用系统。各种光通信技术的进步极大地推动了整个信息技术的发展，可以说光通信技术构成了现代信息社会的基础。

对于光纤骨干网来讲，能够传送的信息量越大越好，这样可以降低单位信息传送成本。对光纤线路的要求是传的距离越远越好，从而增大中继距离，减少中继设备，降低建设和运行维护成本，提高可靠性。例如，掺铒光纤放大器和拉曼放大器出现以后，无电再生中继距离从几十公里增加到了几千公里。在实际应用中，不仅有长距离传送的要求，还有短距离或甚短距离传送的要求。例如，计算机网络的事实标准——以太网技术，其作用距离不过几百米，但是速率却达到了千兆和万兆；在中心交换节点，一个端口的速率可以达到 10Gb/s，总的吞吐量达到几百个 Gb/s，机房之间和机架之间可能传 10Gb/s 或 40Gb/s 的信息；在设备内部由于总速率的提高，信号总线的速率也越来越高，40Gb/s 设备内部就要用到 2.5Gb/s 以上的总线。

以上问题可以简单表示为：如何在较短距离内传送高速大容量的信息？这种较短距离可以是机房到机房之间、机架到机架之间、机框到机框之间、机盘到机盘之间、机盘内部或计算机内部的连接，其传输速率一般超过 10Gb/s，传送距离小于 600m。对于这样高速率的信息，用电连接已经不适应，采用光传送技术是解决这一问题的首选。在较短距离内传送高速大容量的信息是光通信技术发展的又一个新课题。

现有的同步光网络系统是按长距离骨干网设计的，采用的是比较昂贵的串行光发射和接收设备，对光纤线路的要求较高，必须对整个光纤链路进行细致的设计、模拟。而短距离光传送方式与骨干网有很大的不同，由于距离较短，可以不必考虑复杂的光纤线路设计，如色散和非线性等问题，不需要解决光放大等中继问题，对光源的要求也相应降低。此时再采用串行光传送设备显然代价太高，而采用并行传送的方式可以降低每根光纤上的传送速率，降低对光器件的要求，减少连接成本。据统计，百分之八十的 10Gb/s 数据通信链路连接在 100m 距离以内，对廉价 10Gb/s 收发器的需求极为广阔。

甚短距离光传输（VSR，Very Short Reach）技术正是在这种背景下产生的。在 2000 年到 2003 年间，光网络互连论坛（OIF，Optical Internetworking Forum）相继通过了 VSR 的 5 个建议（VSR4-1.0，VSR4-2.0，VSR4-3.0，VSR4-4.0 和

VSR4-5.0) 以及 40Gb/s 的 VSR5 部分建议。CISCO 公司和 CIENA 公司于 2000 年底首先联合发布了基于 VSR4-1.0 的产品, 它采用 850nm 的垂直腔面发射激光器 (VCSEL, Vertical Cavity Surface Emitting Laser) 阵列作为光源, 12 根并行多模光纤带实现了超过 300m 的 10Gb/s 速率传送。

国际电信联盟 ITU-T 也于 2001 年底制定了 VSR 标准: G.693 (optical interfaces for intra-office systems, 又叫做 G.vsr)。目前, 关于甚短距离光传输的标准仍在由各个国际组织制定之中。

可以说, VSR 技术的目的是采用最经济的光通信技术在短距离传输上占据市场, 其最关键技术便是 VCSEL。OIF 的几个建议中, 除 VSR4-2.0/5.0 采用 1310nm 光源外, 其他三个建议都是采用 850nm 的 VCSEL 做光源。目前的骨干网普遍采用长波长 1.3 μ m 和 1.5 μ m 边发射的激光光源, 而没有采用 850nm 的 VCSEL, 这是由器件工艺水平和光纤传输特性等决定的, 如最低损耗窗口、最佳色散窗口等。

VCSEL 相对于传统的边发射激光器来讲, 最大的优势在于低成本。GaAs 基的 VCSEL 研究和制造已经很成熟, 价格非常便宜, 二三美元就可以买到。工作于 1.3~1.5 μ m 波段的 InGaAsP/InP 激光器, 由于异质材料间的折射率差很小, 难以有效研制出高反射率的 DBR (Distributed Bragg Reflector) 来实现 VCSEL 结构, 因此目前长波长的 VCSEL 还不成熟, 无法应用于长距离通信系统; 但对于成本非常敏感的短距离应用场合, 例如接入网、光纤通道和存储区域网、以太网以及 VSR 等应用场合, VCSEL 是比较好的选择。

硅材料对 850nm 波段的光有较好的响应, 并且硅基光电探测器与硅微电子工艺兼容, 易于实现硅基的光电集成, 如光探测器和前置放大电路、信号处理电路的集成, 可实现硅基 OEIC (Optical Electronic Integrated Circuit, 光电集成电路) 光接收芯片规模化生产, 从而能使硅基光接收机造价降低, 因此硅基光接收机和 VCSEL 光发射机组成的收发器在甚短距离光传输上有很重要的应用^[1]。

1.1 甚短距离光传输 (VSR) 技术

1.1.1 VSR 的定义和标准

广义上讲, 任何有别于骨干网传输, 在较短距离内, 能够高效传送信息的光传输系统都可以称为甚短距离光传输系统。

甚短距离光传输的工作距离在几米到 600m 的范围, 600m 到 2km 的距离一般称为短距离传输 (short reach), 2~40km 的范围称为中等距离传输 (intermediate reach), 超过 40km 的传输为长距离骨干网传输 (long haul reach)。

已经规范化的国际标准是 OIF 的 VSR 系列和 ITU-T 的 G.693。

OIF 制定的 VSR4-1.0 详细规定了 $16 \times 622\text{Mb/s}$ 的 STM-64 信号到 $12 \times 1.25\text{Gb/s}$ 并行信号的转换。40Gb/s 的 VSR5 则是面向 STM-256 的。

ITU-T 制定的 G.693 标准中的 VSR600 和 VSR2000 在 600m 和 2km 的距离上，通过优化设计链路参数，降低对激光器的要求，实现 10Gb/s 和 40Gb/s 在单模光纤上的串行传输。

以上两个标准在电接口上直接面向 SDH/SONET 技术，这是由于现在的 SDH/SONET 是城域网和骨干网的主流技术，除了继续作为骨干网的承载技术外，正在向网络边缘转移，通过将多种不同的业务映射进不同的时隙，将传送节点和各种业务节点融合在一起，使得 SDH/SONET 从纯传送网转变为传送网和业务网融合的多业务平台，主要定位于网络边缘。特别是千兆和万兆以太网技术的迅速发展加速了 SDH/SONET 的网络边缘化。2002 年发布的万兆以太网标准仅采用了光纤作为传输媒质，网络工作在全双工方式，没有采用千兆以太网以前的 CSMA/CD 的半双工方式，其物理层标准直接面向 10Gb/s 的 SDH/SONET 接口。

随着人们对信息量的要求越来越大，目前很多技术，例如，万兆以太网、光纤通道、InfiniBand 和 RapidIO 等的发展都要实现在较短距离上传送高速信号，只是不同技术方式所要传送的数据格式不同。已经标准化的甚短距离光传输技术国际标准是面向 SDH/SONET 这种多业务平台的，但是在物理层上采用光纤作为传输媒质是这些技术的共同要求。

因此，任何通过光信号实现较短距离内的互连，满足距离和速率要求的传输技术都可以统称为甚短距离光传输技术，而不必局限于传输的具体业务。其特点是信息传送量很大，而距离又足够近。

本书在 OIF 系列标准的基础上，重点介绍面向 SDH/SONET 的甚短距离光传输技术，同时也涉及到光纤通道、万兆以太网等相关领域。

1.1.2 VSR 在网络体系中的位置

由于短波长 VCSEL 技术的成熟，VCSEL 阵列激光光源的价格非常低，在系统设备内部，例如计算机主板上就可以采用光互连，实现高速信号的传送，其作用距离不过几十厘米。而另一方面，ITU-T 的 G.693 标准则把甚短距离光传输的长度扩大到 2km。一般的甚短距离光传输长度在 300m 左右，这个距离正是局域网的作用范围。

对于电信网络，其体系大致分为局域网 (LAN, Local Area Network)，城域网 (MAN, Metropolitan Area Network) 和广域网 (WAN, Wide Area Network)。终端的用户和服务器分别通过接入路由器和主机路由器 (或交换机) 进入局域网，这些交换机和路由器再通过局域网顶层的核心路由器连接到城域网的中心局，也就是汇接点 (POP, Point of Presence)。不同的汇接点之间的相互连

接通过骨干网来实现，这个过程需要通过广域网路由器，以及密集波分复用（DWDM, Dense Wavelength Division Multiplexing）系统和光交叉连接（OXC, Optical Cross Connection）设备来实现。

VSR 链路在网络体系中的应用以及相关设备如图 1-1 所示：

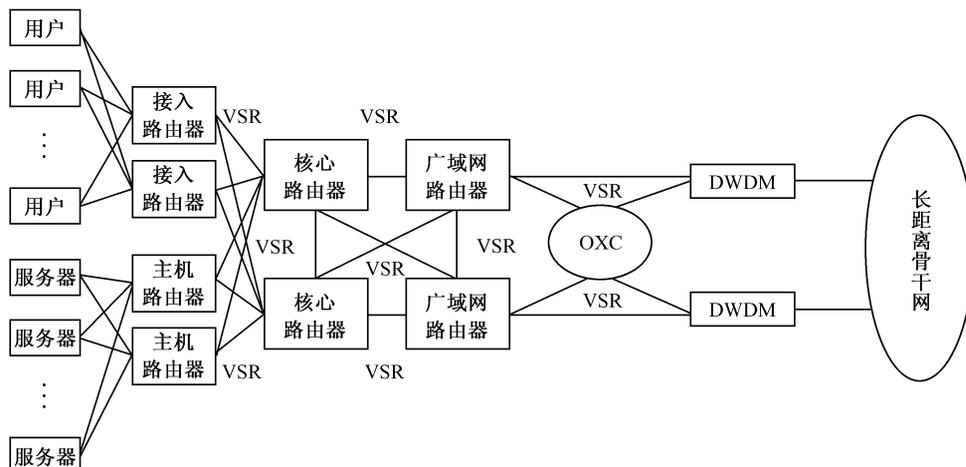


图 1-1 VSR 链路在现有网络体系中的位置

从图中可以看出，VSR 技术渗透到整个网络的各个层面，而不仅仅局限于作用范围较小的局域网内。例如，在骨干网中心机房内，OXC 设备内部光信号的互连，完全可以采用 OIF 建议的并行或者串行方式来实现；在局域网范围内，万兆以太网的 XAUI（10Gb/s 以太网连接单元接口，10Gb/s Access Unit Interface）接口也可以通过 OIF 建议中 4 路并行方式来实现。

从网络 7 层协议来看，VSR 主要涉及到物理层和数据链路层的规范。在物理层上，针对不同的应用场合，它对光源、光纤以及链路的功率分配等进行了详细的规范。在数据链路层上，由于涉及到光信号串并转换的问题，因此需要对所承载信号的帧结构进行重组，加入适当的检错、纠错信息，如 CRC 校验等。

1.1.3 VSR 技术的基本工作形式

从光信号传输的角度来看，VSR 可以分为并行光传输和串行光传输两种。其串行方式通常采用 850nm 或者 1310nm 波长的激光器，根据光源不同而采用相应的单模或者多模光纤，传输速率在 10Gb/s 以上。并行工作方式一般由并行的多模光纤带构成传输媒质，每根光纤上承载波长相同、速率相同的光信号。这种传送方式不同于光通信系统中的波分复用（WDM, Wavelength Division Multiplexing）和光时分复用（OTDM, Optical Time Division Multiplexing），它是一种空分复用方式。通过这种并行空分复用的方式在不降低系统总吞吐量的前提下，

降低每根光纤内的传输速率，从而可以采用低成本的器件和简单的结构，充分发挥并行传输的优势。

从采用的光信号波长来看，可以分为单波长系统和波分复用系统两种。VSR 系统的一个重要方面就是成本的低廉，因此，其单波长工作形式采用价格较低的 1310nm 的 FP 激光器和 850nm 的 VCSEL 光源；而其波分复用系统没有采用骨干网中的密集波分复用技术，而是采用了 1310nm 窗口的粗波分复用（CWDM, Coarse Wavelength Division Multiplexing）方式。

1.1.4 VSR 技术的主要特点

由于 VSR 技术面向在较短距离上传输较高速率的信息，因此 VSR 技术和骨干网光纤传输技术有很大的不同。骨干网系统传输必须考虑到传输过程中存在的损耗、非线性效应、色散和偏振模色散（PMD, Polarization Mode Dispersion）等不利因素，对光源和接收机的要求严格，需要采用较昂贵的器件和各种补偿手段。对于 VSR 技术来讲，虽然其工作速率在 10Gb/s 以上，但是由于工作距离短，采用类似方案是一种浪费。因此，综合考虑，VSR 技术具有如下特点：

(1) 系统传输距离短，传输速率高。

传输距离一般不超过 600m，但是总传输速率在 10Gb/s 以上。

(2) 主要采用并行光互连技术。

同串行光传送方式相比，并行方式可以降低每根光纤上的传输速率，从而降低对系统其他器件的要求，并且可以在需要的时候，适当提高每根光纤上的传输速率，以提高系统总吞吐量。并行光互连技术在实现上采用并行多模光纤带。

(3) 系统面向低成本方案。

利用光互连实现 VSR 技术必须满足市场应用的需要，大量设备的互连决定了其造价不可能过高。对于每一个技术方案，都要求其能够做到具有广阔的市场前景，应用面广，兼容性好，技术上和经济上可行等特点，这样可获得大多数设备提供商的支持。

1.1.5 VSR 技术的发展历史、研究现状和发展趋势

VSR 技术是随着人们对信息量需求的增大而出现的，特别是 10Gb/s 光传输的网络边缘化，促使 VSR 技术迅速发展。从 CISCO 公司 2000 年底发布第一个产品起，在不过 3 年的时间里，VSR 技术已经成为现在通信领域的一个热门技术。由于这一技术主要面向实际应用，因此在国际标准公布的同时，相关产品很快推出。其光收发模块具有低功耗、小封装等特点。例如，廉价的 10Gb/s 并行 VCSEL 光收发模块迅速推向市场。EMCORE 公司 2002 年的 VSR Transponder 产品 MTR8500/9500，符合 OIF 的 VSR4-1.0，体积只有 56mm×82mm×13.5mm。CoreOptic 的 2002 年的 VSR2000-3R2/3/5 产品，符合 ITU-T

的 VSR2000 标准，速率为 40Gb/s，串行传输。

在光源选择和传输方式上，主要有 850nm 多路空分并行、850nm 单路串行、1310nm 单路串行、1310nm 多路粗波分复用等方式。在传输媒质的选择上，有 62.5/125 μm 、50/125 μm 多模光纤、多模光纤带以及普通单模光纤。对于多模光纤，其带宽一般小于 800MHz·km。但是目前新出现的多模光纤（OM3），通过优化设计，其带宽大于 2GHz·km，完全可以在几百米的距离上传输 10Gb/s 的光信号。

并行光互连是目前 VSR 采用的主流技术——采用点对点的光纤带连接。不仅在承载 SDH/SONET 上使用了多模光纤带，多通道千兆以太网、多通道 XAUI 扩展接口以及 4 通道、12 通道的 InfiniBand 模块均趋向于采用并行光互连技术，每一通道的速率在 1Gb/s 到 3.125Gb/s 之间。随着 VCSEL 调制速率的充分挖掘，单通道速率将向 5Gb/s 到 10Gb/s 发展，系统总带宽将超过 120Gb/s。

并行光互连技术不仅可以在几米到几公里的距离上实现高速信息的传送，还可以在更短的距离上实现信息传递，例如，芯片内部、芯片和芯片之间的光互连，即“光到芯片”技术^[2]。这种技术在实现上采用了二维、三维的光互连，传输介质为光波导或者空间光互连。这种多维的光互连部分可以通过倒装焊工艺（flip-chip）实现和 CMOS（Complementary Metal-Oxide-Semiconductor，互补型金属氧化物半导体）电路的耦合，并进一步集成在印刷电路板（PCB，Print Circuit Board）上。目前已有 6×12 通道的并行光互连技术实现每通道 3.4Gb/s，总速率 245Gb/s 的互连，其光源为 850nm 的 VCSEL 阵列。

多路空分并行和 CWDM 串行是进一步提高系统容量的两种较有竞争力的技术方案。二者在技术上并没有优劣之分。多路并行方式对光源的要求低，但是光纤带的成本要高一些；而粗波分复用串行方式虽然采用一根光纤，但是波分复用器件的使用也提高了系统的复杂性和成本。究竟采用哪种方式取决于二者的可靠性和成本，需要由市场应用决定。

廉价的 VCSEL 收发器和多模光纤的组合是目前 VSR 技术的主要工作方式。这种组合可以胜任 10Gb/s 到 40Gb/s 的甚短距离光传输需要。今后 1310nm 和 1550nm 窗口 VCSEL 技术的成熟不仅会对短距离传输带来实质性的变化，而且对于骨干网乃至整个光通信技术都会有重要的影响。

1.2 垂直腔面发射激光器（VCSEL）简介

1.2.1 VCSEL 的产生背景与发展过程

在 VCSEL 诞生之前，传统的边发射激光器一直在光通信中扮演着主要角色。尽管这些年来，边发射激光器在结构优化、制造技术、工作特性以及应用领域方面都取得了巨大进展，但仍存在一些不足。比如在芯片解理之前，不能进行

单个器件的基本特性测试；光束发散角过大且呈椭圆状；不易构成二维光源阵列；制造成本也仍然偏高。正是在这样的背景下诞生了垂直腔面发射的激光器。VCSEL 是光从垂直于半导体衬底表面方向出射的一种半导体激光器。因为在垂直于衬底的方向上并行排列着多个激光器，所以非常适合应用在并行光传输以及并行光互连等领域。

面发射激光的概念是由日本东京工业大学的伊贺教授实验室于 1977 年提出来的，并于 1979 年发表世界上第一个 VCSEL 元件，其结构如图 1-2 所示^[3]。它的有源层材料采用 InGaAsP/InP，双异质结结构，发射波长 $1.3\mu\text{m}$ ，反射镜是金锌合金，具有完全的衬底吸收。因此其反射率很低 ($<80\%$)，低温 77K 下才能激射，阈值电流很高。

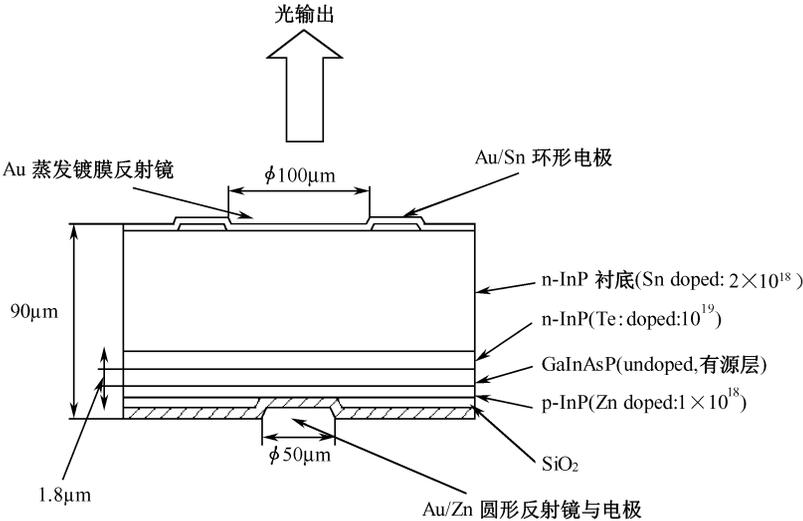


图 1-2 最初的垂直腔面发射激光器结构

1980 年后，人们认识到短谐振腔结构对降低阈值有所帮助，并在低温下实现了低阈值的面发射激光器。第一个室温下的脉冲 VCSEL，是由伊贺实验室在 1984 年做出的^[4]。1982 年伯纳姆等人提出了 VCSEL 不同外延结构的专利，其中的某些部分与当今所用的结构已十分相似。但当时的生长工艺还不足以精确到来制造这种结构。以后的大多数工作就是致力于改进有源区内载流子的限制结构和多层介质反射镜或外延生长半导体反射镜，以便获得高的反射率 ($>95\%$)。

早期的 VCSEL 有源区都比较厚，这是因为考虑到能获得较大的单程增益。而由于反射镜的反射率还比较低，所以阈值电流密度仍然比较高。为实现降低阈值电流密度，人们不断改进 VCSEL 的反射镜设计，并采用圆形掩埋异质结来有效的限制电流，并于 1988 年实现了 GaAlAs/GaAs 的 VCSEL 室温脉冲激射^[5]。1991 年，人们用聚酰亚胺微小圆形台面掩埋的结构实现了 0.7mA 阈值电流下的

连续激光^[6]。

由于这一成果的激励，VCSEL 的研究取得了快速发展并不断取得鼓舞人心的成就。在降低阈值电流、波长可调谐、VCSEL 与光电探测二极管、MESFET 的单片集成等方面有了很大进展。1996 年以后，VCSEL 的性能有了显著提高，VCSEL 的阈值电流以四年一个数量级的速度减少。到 1998 年，VCSEL 的阈值电流已经达到了微安量级。这样 VCSEL 的特性在低功耗器件领域要比水平谐振腔的边发射激光器高出许多，因此人们对它在需要使用多个器件的并行光电子领域中的各种应用寄予厚望。

1.2.2 VCSEL 的主要特点

在光通信和光互连领域，VCSEL 相对于传统的边发射激光器，有着很多无法代替的特点，包括面发射，易于集成阵列，可在晶片上直接测试，表面的外延生长技术，动态单纵模，较低的工作温度，低阈值电流，并且输出光束也与众不同。

1.2.2.1 面发射

同 LED (Light Emitting Diode, 发光二极管) 和 LD (Laser Diode, 激光二极管) 等其他边发射光源相比，VCSEL 光源最特别之处是产生激光的共振腔位于晶面 (wafer) 之间，所以光束是从硅片的垂直面发射，而不是传统的侧面发射，这样可以使 VCSEL 在尚未切片及封装前，整片晶片即可进行检测，无须经过解理划片，简化了检测程序。

VCSEL 激光器的几何结构的特点使得这个装置很适合构成阵列，包括二维空间阵列。面发射允许晶体表面的测试，这对于应用在并行数据传输领域有着重要的意义。传统的边发射激光器虽然也可以构成一维阵列并且也能通过结合反射镜和光栅转换成面发射，但体积较大而且工艺繁琐，成品率也不高。而 VCSEL 激光器只需占据较小的面积并且不需要过多的步骤。

面发射在封装以及与其他光学器件集成的时候也表现出一定的实用性。VCSEL 激光器的普通工作模式是从器件顶端发射。而对于 GaAs 衬底，激光光波长大于 0.85mm 时，对于 InP 衬底，激光光波长大于 1.1mm 时，衬底相对于激光光波长是透明的，这样光也可以从衬底射出。这一特点使得该装置可以将 VCSEL 的衬底一侧制作出电极，便于和其他电路的电极进行焊接，例如通过倒装焊工艺与硅基的驱动电路集成。而且，通过衬底的出射光允许其与透镜阵列单片集成。

1.2.2.2 通过外延生长构成晶面

在 VCSEL 中，需要大量的经过严格控制的有源层、接触层和外延层，所

以与传统的激光器相比需要更多的外延生长工艺。一旦这种外延生长成功，会在很多方面产生重要的意义。例如，不需要再进行解理，窄带反射层会产生一个非常窄的发射光谱，并且具备性能良好的动态单纵模。这样就可以省略了传统激光器中需要结合频率选择光栅的步骤。然而，VCSEL中的短谐振腔使得其光谱宽度比通过光栅控制的边发射激光器宽一些。就整个晶片来说，不同位置的外延层结构也可以有所不同，根据这个原理，可以构造出发射不同波长的VCSEL阵列。

在短波长的激光器中，尤其是AlGaAs基的激光器，需要特殊的覆层或工艺来保护解理面。VCSEL激光器则不需要这样的覆层。与边发射激光器的解理面不同，外延生长的反射镜组所对应的反射峰值波长与温度相关。这个特性可以用来分别调节反射峰和增益峰，以便于阈值电流在很大的范围内几乎与温度无关。另一种降低温度特性的方法是扩大增益带宽。通过GaAs生长AlGaAs组成的反射镜具有非常高反射率，而在长波长的InP基上则很难得到如此高的反射率。因此当前的VCSEL工艺更适合短波长（ $<1\mu\text{m}$ ）方面的应用。

1.2.2.3 低阈值电流

VCSEL所需的驱动电压和电流很小，这个特点对低功率激光器是非常重要的。在某些应用中，例如，高密度的阵列，智能像素，低温连接等需要降低激光器的驱动功率并降低发热量的应用场合是非常必要的。在大多数应用中，激光器并不需要输出大量的光子来提供充分强劲的系统性能。通常1mW的光功率已足够，在许多应用中，光功率限制在1mW以下。因此研究的核心就成了如何在光输出功率小于毫瓦级别的情况下提高相应速度并降低功耗。答案就是使阈值电流远远低于1mA，并且在工作电流处有着高转换效率。这方面VCSEL要比传统的激光器表现的好。VCSEL在低的工作电流下能实现高效率主要取决于两个因素：首先是VCSEL的串联电阻的降低；其次是在VCSEL半径缩小的同时，保持低的阈值电流密度。

1.2.2.4 输出光的特性

在传统的边发射激光器中都需要采用外延层，这使得垂直于衬底方向的光模式宽度总是非常的小（大约为两个波长的宽度）。带来的结果就是出射光在垂直于衬底的方向发散角很大（一般为 30° 甚至更大）。在平行与衬底的方向上，出光孔的宽度通常又比较大，由此产生了非圆形的光束。由于出光孔的宽度被展宽了几个波长，产生了多个光传输模式，并且光束变得高度不对称以及没有了衍射限制。与之相反，带有圆形出光孔的VCSEL激光的是圆形的光束，这简化了后面与其他光学组件的耦合工艺。VCSEL出光孔仅为几个波长宽度，相比传统的激光器出射光孔径要小很多。

随着 VCSEL 出光孔尺寸的增加，也相应产生了更多的横模，无法再保持单横模，光束分成多个横向模式。VCSEL 的横模几乎都是 TEM 模，这是因为激光器的横向尺寸总比等效腔长大的多。虽然准确的模分析结果表明，VCSEL 的横模并非准确的 TEM 模，但纵向场分量很小。在计算模限制因子和光束发散时，实际上可以采用 TEM 模。大尺寸的 VCSEL 很多特性与 LED 比较相象，而相比之下 VCSEL 速度更快，且转换效率更高。

VCSEL 同时还具有良好的动态单纵模特性，纵模间隔满足下列关系式：

$$\Delta\lambda = \lambda^2/2Ln_g \quad (1-1)$$

式中， L 是谐振腔长度， n_g 是群折射率。若 $L = 7\mu\text{m}$ ，则对 $0.87\mu\text{m}$ 的 AlGaAs/GaAs 器件， $\Delta\lambda = 13.5\text{nm}$ ；对于 $1.6\mu\text{m}$ 的 InGaAsP/InP 器件， $\Delta\lambda = 46\text{nm}$ 。由此可见，对于 VCSEL，基模与相邻纵模之间的模间隔较大，使得它们之间具有较大的增益差，从而实现稳定的动态单纵模工作。

VCSEL 激光器具有对称的圆形谐振腔，所以输出光有两个简并的偏振态。为了使工作时能有很低的噪声，必须避免偏振的开关和涨落效应。目前提出了集中偏振控制的方法，如利用偏离衬底晶向某一角度的各向异性应力或应变量子阱的办法。

在光纤通信系统中，LED 的调制速率仅能达到 600MHz，传输距离非常短。在几公里内，LED 虽然便宜，但使用场合有限。相比之下，VCSEL 的调制速率可达数 GHz，并且价格像 LED 那样便宜。虽然传统边发射 LD 调制性能优良，但价格较为昂贵，且发光的效率远差于 VCSEL。

1.2.2.5 与光纤的耦合

VCSEL 的一大优点就是与光纤的耦合既方便又高效。从顶部发射的 VCSEL 激光器与单模光纤耦合的最高效率可达 90%。耦合效率如此高的原因是模式匹配特别好。对于底部发射的 VCSEL 激光器，由于衬底的厚度，激光光束的发散角为 $5^\circ \sim 7^\circ$ ，所以与单模光纤耦合要困难一些。这可以通过在衬底背面腐蚀出一个坑来解决。至于多模光纤的耦合，VCSEL 所发出的光点大小适中，非常适合耦合导入多模光纤中。

VCSEL 与光纤阵列的耦合是目前研究的热点，主要难点是光纤的固定、分开并封装。

从以上 VCSEL 的特点可以看出，VCSEL 同传统的边发射激光器在结构、物理性能上有很大的不同。表 1-1 是 VCSEL 与边发射激光器的主要物理参数比较。