

·学科进展·

# 光纤通信系统超高速集成电路设计

王志功\*

(东南大学射频与光电集成电路研究所暨毫米波国家重点实验室,南京 210096)

**[摘要]** 简述了光纤通信的发展、相关的协议与标准、系统的组成;各种工艺的发展和超高速集成电路的影响;光纤传输系统中关键集成电路的工作原理和电路技术。探讨了我国发展超高速集成电路的方向。

**[关键词]** 光纤通信, SDH, ATM, 超高速集成电路, 光电集成电路

## 引言

激光技术、光纤技术、微电子技术、光电子技术和计算机技术的发展和集总,导致了光纤通信技术的形成,电话、传真、电视和数据等信号传递的爆炸性需求推动了光纤通信的迅速发展。过去二十多年来,光纤通信以及与之相关的技术和工艺取得了革命性的进步,美国同步光网络(SONET)和国际同步数字体系(SDH)标准的建立为光纤通信系统的大规模研制和应用开辟了前进的道路,现在,2.5 Gb/s 高速光纤通信系统已经在世界范围内进入大规模建设阶段,10 Gb/s 系统也已经进入应用。更高速率系统的研制目前正在以下2个方向上展开:(1)40 Gb/s 时分复用(TDM);(2)  $n \times 2.5$  Gb/s 和  $n \times 10$  Gb/s 波分复用(WDM)。同时,光纤通信的飞速发展和进步为超高速集成电路(UHSIC)和光电集成电路(OEIC)设计工程师提供了机遇和挑战。

## 1 光纤通信简介

晶体管以及相继出现的集成电路引发了数字电路和数字系统的蓬勃发展和数字通信的崛起,数字计算机的出现、发展和广泛应用对现代通信系统起到了双重的推动作用:一方面计算机与计算机或远程终端之间的数据交换导致了数据通信(Data-communication)的兴起与发展;另一方面,计算机被应用于通信网络,大大地加强了对复杂信号的处理能力,提高了速度和对网络的有效管理,促进了电信、电视

和数据三网合一的进程,导致了现代通信网的形成和发展。ISDN(综合业务数字网)和 Internet(国际互联网)技术分别从电信网和数据通信网这2个方面向数字一统世界进军,新一代移动通信则为信息的传播开辟出巨大的自由空间。

各种通信技术的发展为信息的传输提供了方便,从而促进了信息的进一步生成,导致社会信息量的爆炸式增加和对信息传输的爆炸性需求,早期,通信是通过有线电路(电话铜线,同轴电缆等)或者无线通道(短波,地面微波,卫星通道等)的形式传播的,有线电路的信道容量是由其上限截止工作频率决定的。电话铜线的截止频率为15—300 kHz,即使采用了ISDN技术也只能传输之路64 kb/s的数字电话和1路16 kb/s的数据;同轴电缆的截止频率低于50 MHz,信道容量为数百路数字电话,无线通道的容量是由载频的高低确定的,微波单波道的最大信道容量约为300 Mb/s,即4 000多路数字电话,所有这些通道的共同特点是容量十分有限。

光纤与微波信道相比,载波的频率高出4—5个数量级,仅在1.55  $\mu\text{m}$ 的光窗口处可用的信道容量高达10 Tb/s,加上光纤在1.3  $\mu\text{m}$ 光波长处还有一个窗口和一条光缆中可有几十根光纤,可以认为,光纤的频率资源几乎是取之不尽的。除此之外,光纤通信还具有保密性好,价格低廉等重要优点。所以,以光纤通信为主干道,构造“信息高速公路”,已在世界范围内成为方兴未艾的大事业。光纤不仅被应用于干线通信,也是构造城域网(MAN)和高速局域网

\* 1998年国家杰出青年科学基金获得者。  
本文于2000年2月14日收到。

(LAN)和有线电视(CATV)的首选媒体。光纤到路边、光纤到大楼、光纤到家,已成为光纤通信发展的大趋势,可以相信,光纤通信广泛应用将是信息化社会的基本前提和重要标志。

## 2 光纤数字通信标准和协议

有多种与光纤通信有关的标准和协议,有代表性包括数字电话复接准同步数字体系 PDH、光纤数字分布接口 FDDI、B-ISDN、同步数字体系 SDH 等。

PDH 是 20 世纪 60 年代和 70 年代初 CCITT(国际电话电报通信委员会)制订的数字电话复接标准。鉴于没有统一的国际制式和复接分接技术上的麻烦,PDH 已让路于新的国际标准 SDH。SDH 只是把 PDH 信道作为低速信源的一类。

城域网 MAN 因其数据速率高(100 Mb/s)、传播距离远而以光纤通信作为其技术基础。在多种 MAN 通信技术中,美国国家标准文件 ANSI X3T9 给出的光纤分布式数字接口 FDDI(Fiber Distributed Digital Interface)和 IEEE 802.6 标准的 DQDB(distributed queue dual bus)是较有应用前景的 2 个标准。

宽带 ISDN,即 B-ISDN 以光纤为基本传输媒质,采用基于 ATM 的特殊分组交换形式进行宽带数据传送。ATM 是一种面向连接的信元(cell)交换技术,采用 48 字节信息附加 5 字节信头的标准信元实现信息的高效传递功能,考虑到支持 HDTV 高速数据信号的需要,在以 ATM 传递技术为基础的 B-ISDN 网确定了 155.52 和 622.08 Mb/s 2 种数据速率。

SDH 是在美国同步光纤网 SONET 接口标准的基础上发展起来,由 CCITT,即现在的国际电信联盟 ITU-T 确立为世界性高速数字传输标准。SDH 包含一系列涉及比特率、网络节点接口、复用结构、复用设备、网络管理和线路系统等 ITU-T 建议。迄今为止 SDH 涉及的大部分基本硬件和软件都已得到定义,已成为新建光纤工程的标准技术,并成为被多种高速数字网络包括 PDH、FDDI 和 ATM 等进入光纤传输主通道的平台技术。

## 3 光纤通信用微电子光子材料与工艺

光纤通信作为微电子、光电子和光子器件、线路和系统之集大成,需要多种材料、工艺和技术。作为现代微电子基础的硅基材料由于工艺成熟,集成度高和价格低廉在光纤通信中同样起着关键的作用。其中,CMOS 艺又因其超大规模集成能力、极低功耗和低成本,在中低数据速率的数字信号处理(分帧/

解帧,打包/解包,复接/分接等)方面占据绝对优势。随着 CMOS 艺水平进入深亚微米( $< 0.2 \mu\text{m}$ )阶段,2.5 Gb/s 速率的光纤通信用集成电路已开发成功。

高速度和大功率是双极性器件的重要特征。先进双极性硅晶体管的截止频率  $f_T$  已超过 20 GHz,人们已经应用高速双极性硅工艺研制出了 10 Gb/s 的系统。

在 10 Gb/s 或更高的数据速率上,采用以砷化镓(GaAs)和磷化铟(InP)来设计各种集成电路具有更大的实践意义和应用价值。首先是 GaAs 和 InP 器件和电路因材料固有的高电子迁移率而具有更高的工作频率和速率。GaAs 和 InP 集成电路的第 2 个特点是其高速率下的低功耗性能,第 3 个特点是具有的发光作用。因而,人们可以将光电器件和电子线路制作在同一芯片上形成光电集成电路(OEIC)。

## 4 光纤传输系统

光纤传输系统是由一段或多段光纤、一系列光子、光电子和微电子的器件、电路和子系统组成的链路、环路或网络。这个系统要完成数据在信源端的接收、组织(分帧、打包、复接等)、光调制、传输、光接收、再生、分接等一系列处理,应用到多种技术,其研制和开发涉及到多种学科,其设备的生产和工程建设涉及到众多的产业和部门。本文将主要讨论光纤传输系统中光电子器件、电路和高速集成电路的设计,图 1 给出光纤通信传输系统的核心组成框图。

## 5 复接器和分接器

发送端的数据处理可以包括低速数据的接收、分帧、打包、复接等一系列操作。考虑到数据信号处理的复杂性,光纤传输系统的设计通常到物理层和数据链路层的部分功能为止,更多的功能则放在更高层次上去处理。因而,如图 1 所示,光发射电路的数据处理部分仅到复接器(multiplexer)为止。

复接的功能就是把多路低速数据信号汇接成一路高速信号。按路数划分,有 2:1、4:1、8:1、16:1 和 32:1 等多种。按电路结构划分,有串行结构、并行结构和树型结构 3 种。具体电路设计主要以工作速度和实现工艺来选取适当的结构,以获得最高的性能价格比。分接完成与复接相反的数据处理功能,按分接路数有 1:2、1:4、1:8、1:16 和 1:32 等多种,按电路结构也有串行结构、并行结构和树型结构 3 种。其电路选择和设计原则与复接器相同。

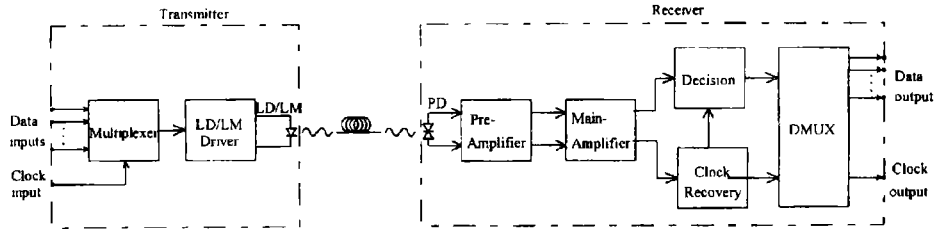


图 1 光纤通信传输系统核心组成框图

### 6 激光驱动器

图 1 左边第 2 个方框是发光/激光二极管驱动电路或激光调制器驱动电路,其功能是把数据信号脉冲放大并变换成足够的大电流/电压脉冲,从而驱动发光器件发射出足够强度的光波信号。高数据速率长距离光纤通信系统中,激光二极管(LD)是基本光源器件。

光纤通信中通用的调制方式为强度调制(IM: Intensity Modulation)。IM 又分为直接和间接 2 种形式。采用直接 IM 方式时,LD 的光强度直接受数据信号的电流或电压控制,数据速率可达 2.5 Gb/s 左右。更高速率时,直接调制引起的啁啾(波长改变)效应与光纤的色散特性结合将导致信号无误码传输距离迅速下降。间接调制方式或称外调制方式的特征是 LD 输出的连续波通过另一个称之为激光调制器件进行调制,其特点是啁啾效应大为减小。因此,

10 Gb/s 及更高速率的系统多采用间接调制。常用的激光外调制器有铌酸锂(LiNbO<sub>3</sub>)和电吸收式(EA) 2 种。

图 2(a)示出作者在德国客座研究期间设计的一种超高速砷化镓激光二极管驱动电路<sup>[1]</sup>。它由 3 级组成:前置放大器、主放大器和电压输出。在前置放大器中,负载电阻<sub>1,2</sub>和电感 LD<sub>1,2</sub>组成一个高频电压补偿电路。主放大器是采用电流补偿技术的差动输入单端输出放大电路。EF<sub>6-8</sub>、EF<sub>10</sub>和 C<sub>C</sub>组成的电容耦合电流放大器使脉冲的下降沿,即 LD 关断时间大为减小。输出级使用了两级源极跟随器,第二级直接由 LD 提供偏置,特点是从 LD 向驱动器看过去的信源内阻很小。面积为 1 mm × 1 mm、采用 GaAs/AlGaAs 量子阱 HEMT 工艺制造的芯片放大照片如图 2(b)所示。在芯片测试得到的电路的最大输出电流为 90 mA。25 Gb/s 数据速率时的输入和输出信号眼图如图 2(c)所示。

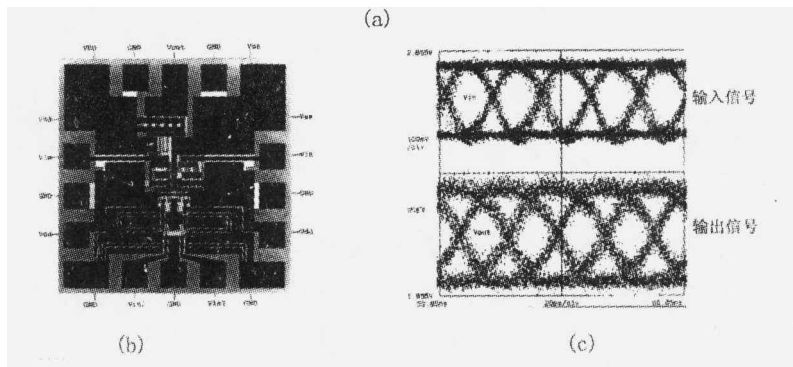
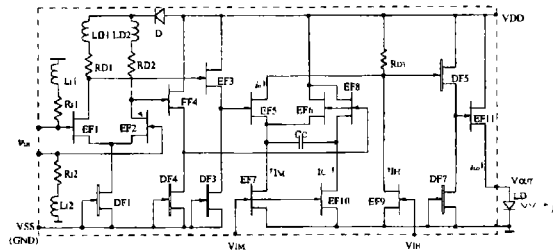


图 2 超高速砷化镓激光二极管驱动电路 (a)电路图; (b)芯片照片; (c)测试眼图

## 7 光接收前端模块

一个完整的光接收机通常包括光检测器(PD)、前置放大器、主放大器、时钟恢复电路、数据判决电路、分接电路和一系列监控电路。

光检测器的作用是将来自光纤的光信号转换成电流信号。有3类光检测器件:雪崩二极管、pin二极管和MSM二极管。雪崩二极管对注入光电子有倍增作用,可用于高灵敏度光电接收。pin二极管具有频带宽,噪声系数小,使用条件相对简单的特点,可用于超高速信号的接收。MSM具有工艺简单的特点,广泛应用于光电单片集成电路中。

前置放大器的作用是将来自光检测器的电流信号转换成电路中通常处理的电压信号。高速系统大多采用跨阻放大器。低噪声,高跨阻和适当带宽是设计跨阻放大器的基本目标。

## 8 主放大器

前端输出的信号电压大约在几毫伏到几十毫伏,为达到时钟恢复和数据判决电路需要的几百到上千毫伏的信号幅度,需要接入一个30—50 dB增益的主放大器。它必须在输入信号幅度大范围变动的情况下提供幅度恒定的输出电压。有2类放大器可用来实现这2个功能:自动增益控制(AGC)放大器和限幅放大器。前者广泛应用于模拟信号接收系统。后者在用于二进制数字信号的放大时,具有电路简单,易于设计的优点,且其限幅作用直接施加到信号的每一个脉冲,不存在AGC放大器中固有的时间常数选取问题。所以,在光数字通信接收机得到广泛应用。高灵敏度、大动态范围和高稳定度是设计限幅放大器的3大目标。作者设计的超高速限幅放大器砷化镓集成电路芯片可工作在大于20 Gb/s的数据速率上<sup>[2]</sup>。

## 9 数据判决电路

数据判决电路的原理是:对数据信号按它的比特速率在最有利的时刻进行取样,将取样值与判决电平进行比较,决出高低,即判决出“1”和“0”,然后以2个明确无误的逻辑电平表示并保持到下一取样时刻。在超高速数据通信系统中,通常采用主从数据触发器即MS-DFP来实现数据判决的功能。利用0.2  $\mu\text{m}$ -GaAs-HEMT工艺,作者已经研制出了工作速率超过30 Gb/s的数据判决电路<sup>[3]</sup>。通过采用并行处理方法,工作速度可以进一步提高

到40 Gb/s以上<sup>[4]</sup>。

## 10 时钟恢复电路

时钟恢复电路—特别是输入为非归零(NRZ)格式的数据信号时—包含2个功能子电路:信号预处理电路(Preprocessor)和主处理电路。预处理电路的功能是从输入的数据信号中检测出数据流中的上升和下降沿,获得原始时钟信号的频率和相位信息。大体上有2种常用的预处理电路:(1)一个差动的微分电路加一个全波整流电路;(2)一个小于半周期延迟线加一级异或门电路。结合前一种电路的微分功能和后一种电路的异或逻辑功能,可得到一种既可单片集成,又可保持全差动形式的预处理电路<sup>[5]</sup>。

主处理电路的功能是在预处理电路产生的单极性脉冲序列作用下形成一个与发送端时钟同步的时钟信号。有4种主处理电路:(1)无源滤波器加限幅放大器;(2)锁相环;(3)窄带再生分频环路;(4)注入振荡器。

无源滤波器加限幅放大器的方案具有电路简单、性能稳定的优点。但在实现超高速的设计目标时受到限制,无法在2.5 Gb/s及以上数据速率的系统中加以考虑<sup>[6]</sup>。

等效于高Q值有源滤波器的PLL在数据通信中得到了十分广泛的应用。其优点包括能够单片集成实现和可以通过在环路中加入分频器实现多种输出/输入倍频关系。缺点是电路复杂和存在失锁的危险性。作为超高速数据通信中时钟恢复电路用的PLL电路,其设计更为困难,原因在于缺乏高Q值稳频无源元件使得在芯片上的超高频、高稳定度压控振荡器(VCO)难于实现。作者利用全对称全集成的VCO专利电路,已经实现了19 Gb/s的时钟恢复电路<sup>[7]</sup>。

窄带再生分频式时钟恢复方案的主要目的在于用1倍频率的滤波器和放大器从最高为2倍速率的数据信号中获得1倍频率的时钟,从而把滤波器和/或集成电路的工作上限速率提高1倍,同时,把滤波器的等效Q值提高数倍<sup>[8]</sup>。特别是当这种方案同并联数据判决电路配合应用时,整个数据再生电路达到最优组合。在此方案的基础上,作者用多级级联的单调谐放大器取代原方案中无法单片集成的滤波器和宽带限幅放大器,发明了全集成的窄带再生分频式时钟恢复电路专利技术<sup>[9]</sup>,并实现了10/20 Gb/s和20/40 Gb/s 2种数据速率组合的单片集成电路<sup>[10—12]</sup>。图3为一个实现该方案的电路方框图。

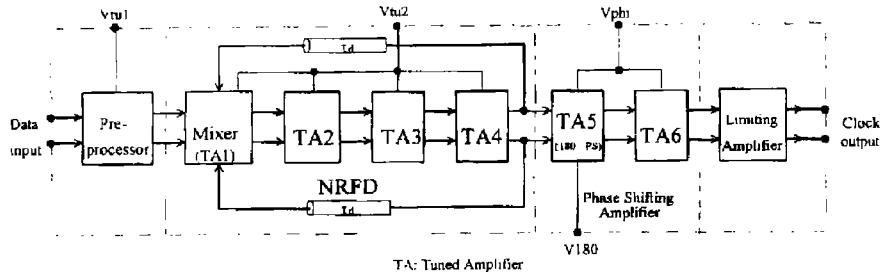
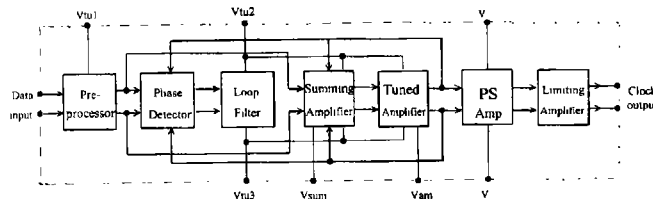


图 3 窄带再生分频式时钟恢复方框图

PLL 辅助注入锁定振荡式时钟恢复和倍频技术是作者将注入锁定振荡器技术与 PLL 技术相结合而发明的<sup>[13]</sup>。利用该专利技术已经设计出了 10、20

和 40 Gb/s 速率的芯片。图 4 中给出该专利技术的电路方框图(a), 40 Gb/s 速率的芯片放大照片(b)和测试结果(c)<sup>[14]</sup>。



(a)

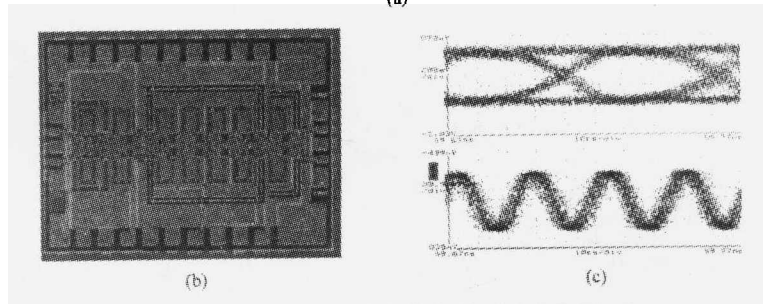


图 4 PLL 辅助注入锁定振荡式时钟恢复和倍频技术

(a)PLL 辅助注入锁定振荡式时钟恢复和倍频电路方框图;(b)40Gb/s 速率的芯片放大照片;(c)和测试结果

### 11 光电集成电路与单片集成系统

在光电集成电路(OEIC)的研制方面,GaAs 工艺已经趋于成熟。单片的光发射机和光接收机已经在 10 Gb/s 的超高数据速率上研制成功<sup>[15]</sup>。作者参与研制成功的激光驱动器加激光二极管单片光发射机芯片,其最高工作速率已超过 5 Gb/s<sup>[16]</sup>,并在 2.5 Gb/s 上做出了 10 路发射阵列。

GaAs 激光发射 OEIC 的一大缺憾在于其激光二极管发光波长在 850 nm 附近,只能用于短距离的光互连网络中。在远程光纤通信方面,InP 成为主导材料,因为其发光器件的光波长恰好可以调到光纤的 1.3 和 1.55 μm 附近两个光窗口内。因此,InP 材料一方面用于制作光纤通信用的发光和激光二极管,另一方面用于制作光纤通信用 OEIC。

### 12 我国光纤通信用集成电路技术的现状和发展方向

我国在光纤通信的建设方面已经取得长足进步。已建成几十条光缆通信电路,总长度达 10 000 km。在光纤通信用 1.3 μm 和 1.55 μm 量子阱分布反馈激光器,掺铒光纤放大器(EDFA),激光调制器和系统集成等技术方面已取得了瞩目成绩,OEIC 的关键技术也已经获得突破。

然而,我国光纤通信技术的整体还是落后的。已建和在建的光纤通信干线系统几乎全都是从国外引进的,而在我国自己开发的系统中,大部分的器件和几乎全部的关键高速集成电路都是进口的。

为了改变我国集成电路研制的落后局面,我们一方面要继续完善和提高现有工艺线的技术水平和

生产能力,要研究、开发和利用包括 CMOS,双极性硅、GaAs 和 InP 等多种工艺;另一方面要借鉴国外无生产线(fabless)集成电路设计模式,发挥人才资源和智力资源方面的优势,提高集成电路设计水平,设计并实现具有自己知识产权、包括光纤通信在内的各种信息产业用集成电路。要以系统应用和市场需要带动研究和开发,走产学研结合的道路。只有这样,才能在建立国家信息基础设施的进程中,赶上世界潮流,为国家创造出巨大财富。

### 参 考 文 献

- [1] Wang Z G et al. Integrated laser diode voltage driver for 20 Gb/s optical system using 0.3  $\mu\text{m}$  gate length quantum well HEMTs, IEEE J-SSC, 1993, **28**:829—834.
- [2] Wang Z G et al. 17-GHz-bandwidth 17-dB-gain 0.3  $\mu\text{m}$ -HEMT low-power limiting amplifier., Tech. Dig. of Symp. on VLSI Circuits. 1995, 97—98.
- [3] Wang Z G et al. Low power data decision IC for 20—40 Gb/s data links using 0.2  $\mu\text{m}$  AlGaAs/GaAs HEMTs., Electron. Lett., 1996, **32**:1 855—1 856.
- [4] Wang Z G. Numerical estimation of high-bitrate performances of ultra-high speed data decision and demultiplexing ICs., Electron. Lett. **33**: 290—292.
- [5] Wang Z G et al. 7.5 Gb/s monolithically integrated clock recovery using PLL and 0.3  $\mu\text{m}$  gate length quantum well HEMTs., Proc. of ESSCIRC '93, 1993, 222—225.
- [6] Wang Z G, Langmann U, Bosch B G. Multi-Gb/s silicon bipolar clock recovery IC., IEEE J.-SAC, 1991, **9**:656—663.
- [7] Wang Z G et al. 19 Gb/s monolithically integrated clock recovery using PLL and 0.3  $\mu\text{m}$  gate length quantum well HEMTs., Tech. Dig. of ISSCC'94, 1994, 118—119.
- [8] Wang Z G, Langmann U. New proposal for multigigabit/s clock recovery IC based on a standard silicon bipolar technology., Electron. Lett. 1987, **23**:454—456.
- [9] Wang Z G, Berroth M. 德国发明专利号 P43 38 873.
- [10] Wang Z G et al. Circuit techniques of a 10 and 20 Gb/s clock recovery IC using a fully balanced narrowband regenerative frequency divider and 0.3  $\mu\text{m}$  HEMTs., Dig. of Tech. Papers of ISSCC'96., 1996, 204—205.
- [11] Wang Z G et al. 10 and 20 Gb/s clock recovery GaAs IC with 288° phase-shifting function, Electron. Lett. 1996, **32**: 1 498—1 500.
- [12] Wang Z G et al. 40 and 20 Gb/s monolithic integrated clock recovery using a fully-balanced narrowband regenerative frequency divider with 0.2  $\mu\text{m}$  AlGaAs/GaAs HEMT., Electron. Lett. 1996, **32**: 2 081—2 082.
- [13] Wang Z G, Thiede A. 德国发明专利号 P197 24 088.7.
- [14] Wang Z G et al. 40 Gb/s/GHz clock recovery and frequency multiplying AlGaAs/GaAs-HEMT-IC using injection-synchronised narrowband ring-VCOs and auxiliary PLLs., Electronics Letters. 1999, **35**, (14): 1 151—1 152.
- [15] Wang Z G et al. 10 Gb/s monolithic integrated optical receiver including clock recovery, data decision, and 1:4 demultiplexer., Proc. of ESSCIRC '95, 1995, 354—357.
- [16] Hornung J, Wang Z G, Bronner W et al. 7.4 Gbit/s monolithically integrated GaAs/AlGaAs laser diode-laser driver structure., Electron. Lett., 1993, **S19**:1 694—1 696.

## IC DESIGN FOR ULTRA HIGHSPEED OPTICAL FIBER TRANSMISSION SYSTEMS

Wang Zhigong

(Institute of RF- & OE-ICs and National Key-Lab of MMW, Southeast University, Nanjing 210096)

**Abstract** This paper introduced the revolutionary progress, the related standards and protocols as well as the system construction of optical fiber communications; summarized the advancement of CMOS, Si-bipolar, GaAs, InP and their impact on the development of ultra high-speed ICs for optical fiber transmission systems; and discussed all key functions in optic-fiber transmission systems and their IC realization, different circuit techniques and the design methods.

**Key words** optic-fiber communication, SDH, ATM, ultra-high speed ICs, OEICs