

# 光电子学与光电子产业专题系列介绍

## 未来光通信发展的关键——光电子集成电路

王 启 明

(中国科学院半导体研究所,北京 100083)

本文从光纤通信发展的角度介绍和评述了集成光电子回路(OEIC)的发展现状和未来趋向,指出了当前光纤通信的三大主要发展方向:超大容量光通信,超高速光通信和综合数字服务网的发展,与集成光电子回路发展有极为密切的关系。文中并指出若干有代表性的集成光电子回路系统的发展对未来光通信产业的重要性。

### 一、光通信的发展动向

70年代初低损耗石英光纤的研制成功和室温连续工作砷化镓激光二极管的问世,开辟了实用化光通信的新纪元。在短短的15年间,光通信技术以其罕见的速度更新换代地飞快发展,完成了短波长多模光纤通信技术系统,1.3 $\mu\text{m}$ 多模光纤通信技术系统和1.3 $\mu\text{m}$ 单模光纤通信技术系统,并已开始进入开发1.55 $\mu\text{m}$ 波长单模光纤相干光通信技术时代。不同时期都有各种光通信系统进入工程实用阶段,最具有代表性的成就要算美国AT&T公司与英、法合作敷设横越大西洋的TAT-8光海缆通信线路,全长6500km,传输信息容量为560Mb/s,相当于可同时开通四万条双工话路,于1988年完工交付使用。作为TAT-8的姐妹作,是美国与日本合作在太平洋海域敷设的代号为“夏威夷-4/横越太平洋-3”的光海缆通信网,以此将把美国西部的加州与夏威夷、关岛、日本和菲律宾连接起来。采用的都是长波长单模光纤通信技术,也已于1989年完工交付使用。

目前用于主干线的光通信系统大都采用五次群(622Mb/s)脉码制式,而在地区和市话局间通信系统则多为四次群(140Mb/s)和三次群(34Mb/s)容量。

虽然单信道传输最大已报道达到8Gb/s,但却还处于实验研究阶段。

当前光通信的发展主要集中在以下三个方

面:

#### 1. 相干光通信——长距离超大容量光通信

现代社会的高度发展,通信的内涵早已超越了邮电往来的范畴,由人对人的通信进入到人对机的通信以及机对机的通信,信息的需求量有着惊人的增长。例如,传送一路高清晰度电视,信息容量达到1Gb/s。何况人们要求在同一信道上还要荷载各种信息!因此,扩大单纤传输容量是未来信息化社会对通信技术提出的迫切要求。仅仅依靠压缩脉码宽度来提高传输比特率在技术上是有限度的,在经济上也不是适宜的。扩大容量的方向将是大力发展单纤复用技术。光学时分复用和波分复用技术已有相当程度的发展,波分复用技术可以尽量利用石英光纤低损耗窗口巨大传输潜力,但是直接接收强度调制的单模通信技术由于光频展延比较宽,信道间隔至少要求大于100GHz。单模石英光纤的低损耗窗口在1.45—1.65 $\mu\text{m}$ 之间,相当于有100左右的信道可以同时复用,这当然是有可观的潜力。

然而,随着动态单频激光器的研制成功,如果采用相干光通信技术,则信道间隔还将缩小1000倍,单纤复用的信道可以达到10万路以上。如若每个信道容量仍为622Mb/s,则单纤传输容量达到了 $6.2 \times 10^5$  Gb/s的惊人数字。这个数字相当于同时可以传送1000亿个话路,当然这只是理论上的估计。高密信道的复用系统在技术实现上难度是相当大的。最近,美国

报道已研制出 10 个波长复用的通信实验系统, 总传输容量达到 20Gb/s。

相干光通信又由于采用了外差接收技术, 接收灵敏度可提高 20 dB 以上, 它相当于可使中继距离延长 100km, 由此可见, 相干光通信技术尤其适用于长距离传输超大容量的洲际通信系统。

## 2. 超高速短距离光通信

前面谈到超大容量光通信主要立足于波分复用技术的发展, 不一定追求单信道有很高的比特率, 以期达到延长中继距离和降低造价。但是从另外一些方面的应用要求来看, 则需要发展超高速光通信, 尤其是在超高速电子计算机的光学互连的应用方面。然而, 这在中继距离方面几乎没有要求, 甚至只在厘米量级的范围。由于光通信线有抗电磁干扰的特点, 目前它已经成功地用于电子计算机终端的连接以及中心处理器与子机的互连网络中。现在的注意力是如何在电子计算机中采用光通信互连, 以克服由于电回路寄生参量产生的延迟导致瓶颈阻塞效应的出现, 达到提高运算速度的目的。人们正致力于在电子计算机硅芯片实现光通信互连, 有可能获得运算速度三个量级的提高, 而使之实现超高速运算。目前, 电子器件的开关速度已达到 10ps 水平, 因而需要发展 ps 脉码高速光通信技术, 而这种通信技术的发展又是建立在 GaAs 与 Si 集成的兼容制备工艺上面。

除此之外, 电子计算内部由于采用了光通信互连, 因而利用光波的空间变换与传输特性, 还可能实现光学并行处理的功能, 这就可能使运算速度和信息处理速度同时得到了提高。因此, 光通信技术引入电子计算机系统有可能促使超高速计算机的实现。

## 3. 综合业务数字网的发展

前面谈到, 信息化社会的发展, 通信已经超越了邮电往来的范畴。从广义上说, 通信就是信息传输与处理。人们期望它实现工厂生产的自动控制与管理, 实现办公系统的自动化以及满足人们在工作、学习、生活多方面的综合要

求。由此可见, 未来的光通信将发展为复杂的联网, 同时还兼具对信息自动综合处理的功能。综合数字网 (IDN)、地区用户网 (LAN) 以及综合业务数字网 (ISDN) 是当前光通信发展的一步步推进的目标。通信连网需要有高速开关网络来实现实时自动交换的功能, 因此高速实时开关网络的研制是实现数字通信网的关键。半导体光双稳器件的发展已经提供了可集成化的高速开关网络的光明前景。预计到 1995 年, 美国的广大用户将会普遍接受进入光通信用户网。这将使信息化社会的发展迈开重要的一步。

## 二、OEIC, 在光通信发展中的 重要性和现实性

以上谈到的光通信应用与技术的发展都将对系统的集成化提出了迫切的需求。5Gb/s 以上的单信道传输比特率的提高, 只有将光器件与电子器件集成在一起, 最大限度地消除寄生参量的影响, 才有可能实现。很难设想, 众多信道的波分复用系统如果不是集成在小型化的系统芯片上, 能够满足实用化的工程要求。高速开关网络也必须以高密度矩阵集成技术来发现, 开关矩阵的每一个元素又都同时包含有光和电子器件的集成。作为电子计算机光互连用的光发射器, 也将是 GaAs 光器件与 Si 电子器件与电路的单片集成。此外, 光通信作为产业的发展进入千家万户时, 在高可靠性和低造价成本方面都将提出更高的要求。它同样必须依靠集成化来解决。这便是 OEIC, 在光通信发展中所占有的重要地位。

OEIC, 是 70 年代末期开始发展的, 当时只是进行一个光器件与一、二个电子器件的简单集成的研究, 目的是探求 OEIC, 的相容性工艺途径。10 年来 OEIC, 已经有了迅速的发展, 80 年代初期人们还在学术上讨论光集成与光电子集成的发展前途时, 日本早已悄悄地从 1980 年开始由政府出面资助 13 家公司联合组织了光技术共同研究所 (OJL), 投资 7500 万美元, 着手开展提高 OEIC, 基质材料质量的研

究、基础集成工艺的研究以及基本集成单元可行性研究,发展了细聚焦离子束综合加工技术,完成了世界上第一个全密封 OEIC, 干法工艺研究系统。与此同时,各大公司则分工开展了集成系统目标产品的研究工作。例如,富士通公司发展 1Gb/s 数字控制系统;东芝公司发展波分复用系统;三菱公司发展多路数据收集系统;日立公司发展 1Gb/s 数字控制系统。通过六年时间的分工与合作研究,成效是巨大的。今天,日本已成为世界上在 OEIC, 方面首屈一指的国家,在完成第一阶段目标之后,仅用一年的时间又组织了第二阶段联合行动,建立了光技术研究实验室 (OTL), 打算用八年时间完成 10 Gb/s 容量的智能化 OEIC, 光信息处理系统。这就将为未来信息化社会的需求奠定了重要的基础。

OEIC, 的研究工作虽然起源于美国加州理工学院 A Yariv 教授实验室,但是直到 1984 年美国的 OEIC, 工作进展滞缓,仍停留在大学实验室为主的研究阶段。1984 年间当发现日本人已取得重大的实质性进展后,美国军方和产业界感到吃惊,于是也仿效日本组织了“光回路研究中心”,出资支持大学实验室加强 OEIC, 研究工作。但是迄今为止,即使像 AT&T Bell Lab., IBM 公司这样实力雄厚的地方,在 OEIC, 方面的投资规模和研究条件也还不如日本公司的水平,这便成为美国对争夺未来 OEIC, 产业市场感到担忧之处。今天的 OEIC, 研制工作无论从集成的水平和规模方面都有了惊人的发展与提高。1987 年富士通报道研制成功  $4 \times 4$  GaAs 开关矩阵 OEIC, 芯片, 以及除了光器件外所包含的电子元器件多达 800 多个。

美国东部的 Honeywell 公司和西部的 Rockwell 公司, 是受军方支持的重要的发展 OEIC, 的主要基地,据报道, Honeywell 公司迄今已研制成功含有 200 个 GaAs FET 逻辑门的 1:4 OEIC, 多路复用器芯片, 能够传输 1 Gb/s 的光信息, 还研制成功 1:8 OEIC, 多路解复器芯片, 含有 250 个逻辑门, 他们的目标是要发展 16:1/1:16 OEIC, 时分复用与解复系

统。1989 年底, IBM 公司实验室报道研制成功由四个 GaAs MSMPD 光电探测器与 8000 个 GaAs MESFET 集成的光电子处理器芯片, 处理速度比目前最快的电子计算机要快若干倍, 打算用于电子计算机光互连, 这是迄今集成规模最大的 OEIC, 芯片。

AT&T Bell Lab. 致力于大规模全光开关矩阵的研制, 依靠他们首先发展的 SEED 光开关器件, 已经完成了  $100 \times 100$  大型光开关矩阵, 并且每个开关元素都辅有偏置电路, 无疑这对数字化光信息处理技术与光交换系统的应用迈出了重大的一步。1990 年 3 月 AT&T Bell Lab. 的 Alan Huang 博士首次公开发表了用这种 SEED 器件列阵研制成功了全光学信号处理器, 运算速度已达每秒一百万次, 并声明将要达到每秒一亿次的运算速度。

由上所述可见, OEIC, 已经开始进入有目标的应用开发期, 它在未来新一代光通信技术的发展中占有不可替代的极为重要的地位。

大规模 OEIC, 的成功, 首先取决于能否大幅度降低光源器件的功耗。目前的单量子阱激光器已将功耗降到毫瓦量级, 正在积极研究的量子箱结构激光器其功耗有希望降到  $10 \mu\text{W}$  量级, 这将与目前微电子器件的功耗水平相当。

OEIC, 芯片的功能要比微电子芯片的功能更为多样化。因此 OEIC, 芯片中将要求含有多种不同功能的器件。为了保证芯片的综合功能和获得高的成品率, 为了尽量减少热加工的次数, 集成工艺的兼容性是很重要的。超晶格、量子阱材料具有很好的多功能兼容特点, 在同一量子阱材料层上可以同时研制出优质的激光器、检测器、调制器、光波导以及超高速电子器件。亚微米介质光栅同样具有多功能的特点。例如, 光栅可以作为激光器的布拉格反射镜, 可以实现波长调谐, 可以做成高效率的输入输出耦合器, 以及做分路、合路器, 还可以做起偏与检偏器等。由此可见, 量子阱、超晶格材料生长技术, 与介质光栅技术的利用使 OEIC, 在纵向和横向加工上都获得了很高的工艺兼容性。

无论从技术的成熟性角度和经济效益来考

虑,未来的大规模 OEIC,将会是尽量采用以 Si 材料为基质 GaAs 或 InP 材料为辅的混合材料体系。OEIC,的电子回路将尽量采用业已相当成熟的 Si 为基质的材料。目前二种不同晶格常数材料的优质匹配生长已经基本得到了解决。最近报道,在硅衬底上用 MBE 生长的单量子阱激光器的阈值电流达到 3mA 量级。无疑这是 OEIC,通向未来“经济效益”的重大进展。

已经发展成熟的 MBE MO-CVD (用于量子阱超晶格材料生长) EB 技术和 RIBE 技术 (用于各种光栅及微细图形的干法加工)将成为发展 OEIC,的关键工艺。

### 三、有代表性应用前景的 若干 OEIC,集成系统

前面谈到,由于 OEIC,芯片比微电子芯片兼具更多的功能,含有更多类别的光学和电子器件。因而集成工艺更为复杂,难度也要大得多。无论从经济效益和技术代价的角度来考虑,人们不会过早地热衷于集成规模很大的 OEIC,芯片的研制。本世纪内 OEIC,将主要对光通信系统中高性能的关键性的必不可少的系统部件做出贡献。

#### 1. OEIC,多路复用与解复用系统

复用系统包括时分和波分复用。如前所述波(频)分复用是扩大通信容量的主要途径,只有通过系统的集成,才可能将众多不同波长的光载波集中馈入一个集总波导中,再与传输光纤高效率地耦合输出,同时又将不同频率的载波光束通过不同周期的光栅在空间上分离由各个接收系统收集处理。这样众多信道的系统由分立元器件来组合,无论从实用化的角度或经济的角度来考虑,都是不可取的。

时分复用技术可能更多地应用于多道高速信息采集和处理系统中,通过时分复用技术的采用,可以利用一个单纤同时传输多个信道实现并行处理的功能。

#### 2. OEIC,高速光开关矩阵

综合业务数字网和数字化光信息处理系统

的发展,需要有具备逻辑功能的高速光开关矩阵,以实现高速光信息交换。每个光开关素元都要通过波导交叉连接组成复杂的开关网络,同时还要求辅有相应的偏置电路,它必然是一个 OEIC,系统。日本 NTT 公司已研制成功  $20 \times 20$  有放大和逻辑功能的增益开关矩阵 OEIC,芯片。

#### 3. OEIC,光外差接收机

目前用于直接强度检测的 PCM 光通信系统,其光发射机比接收机显得复杂。但是对相干光通信系统而言,接收机的复杂性和难度都较发射机为甚。一个光外差接收机必须配有可调谐稳频激光器,作为本地振荡源,它的输出通过波导定向耦合器与输入信息光载波拍频后由光电探测器接收后,馈入光频差放大器,由差分放大器的输出调谐本地光源,以保持中频信号的稳定。这样复杂而又精密的回路结构,只有通过集成才可以达到实用化的需求。

#### 4. OEIC, GaAs/Si 高速光发射器

GaAs/Si 混合材料 OEIC,高速光发射器,将是发展超高速光电子计算机的基本关键单元。采用 GaAs 光源有两方面优点:其一是因为对 GaAs 发射近红外波长辐射,集成化接收机可以由完全成熟的 Si 器件与电路来实现;再则 GaAs 发射的波长肉眼可以看见便于对准,而全部逻辑运算都由成熟的 Si 器件与电路来执行,经济上很适宜。前面谈到 Si 基片上制备低功耗的量子阱激光器,现在已得到重要突破, GaAs/Si 高速光发射器的研制已指日可待,它将使超高速光电子计算机的发展提上日程。

#### 5. 小型化低功耗低成本 OEIC,光收发机

光通信产业的发展对光收发机的成本和可靠性提出了更高的要求,尽管这种收发机用分立元器件的组装完全可以达到,但是一旦光通信技术进入到众多的普通家庭中,系统造价的降低和可靠性的提高就显得尤为重要。解决这一问题的途径是采用 OEIC,技术,因此 OEIC,的发展也就成为促进光通信产业发展的要素。人们预测,一旦地区用户网进入每个家

(下转第48页)