

# 光电子集成回路(OEIC)——未来光通信 产业发展的关键

王 启 明

(半导体研究所所长)

## 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。短短的 15 年间光通信技术以其罕见的速度飞快发展,完成了短波长多模光纤通信技术系统、 $1.3\mu\text{m}$  (微米) 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  $1.55\mu\text{m}$  长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 6500 公里,传输信息容量为  $560\text{Mb}(\text{兆比特})/\text{s}$  (秒),相当可同时开通 4 万条双工话路,于 1988 年完工交付使用。作为 TAT-8 的姐妹作则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、关岛并和日本菲律宾联接起来,采用的都是长波长单模光纤通信技术,也于 1988 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 ( $560\text{Mb/s}$ ) 脉码制式,而在地区和市话局间通信系统则多为四次群 ( $140\text{Mb/s}$ ) 和三次群 ( $34\text{Mb/s}$ ) 容量。

虽然单信道传输最大容量已报导达到  $8\text{Gb}(\text{千兆比特})/\text{s}$ ,但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,信息容量将达到  $1\text{Gb/s}$ ,何况人们要求在同一信道上还要荷载各种类别的信息,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,在经济上也是不适宜的。因此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  $100\text{GHz}(\text{兆赫})$ ,单模石英光纤的低损耗窗口在  $1.45\mu\text{m}-1.65\mu\text{m}$  之间,相当于有 100 左右的信道可以同时复用,显然,潜力是相当可观的。

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,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 560Mb/s,则单纤传输容量可达到  $5.6 \times 10^5 \text{Gb/s}$  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。最近美国报导已研制出 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 20db 以上,它相当于可使中继距离延长 100 公里,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,以期达到扩大中继距离和降低系统造价。但是从另外一些方面的应用要求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方面的应用,然而这在中继距离方面则几乎没有要求,甚至只在厘米量级的范围。由于光通信具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,有可能使运算速度提高三个量级,而使之实现超高速运算。目前电子器件的开关速度已达到 10 PS 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 (砷化镓)与 Si (硅)集成的兼容制备工艺上面。

除此之外,电子计算机内部由于采用了光通信互连,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,人们期望通过它实现工厂生产的自动控制与管理、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,同时还兼有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出重要的一步。

## 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,都对系统的集成化提出了迫切的需求,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 5Gb/s 以上的单信道传输比特率的提高,很难设想众多信道的波分复用系统不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实现,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、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,也同样必须依靠集成化来解决。这些便是 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,当时只进行一个光器件与一两个电子器件的简单集成研究,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,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多信道 OEIC 集成系统,东芝公司发展波分复用集成系统,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 6 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 1 年的时间又组织了第二阶段联合行动,打算用 8 年时间完成 10Gb/S 容量的智能化 OEIC 光信息处理系统,这将为未来信息化社会的需求奠定重要的基础。

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 工作进展迟缓,仍停留在大学实验室为主的研究阶段。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。迄今为止,即使象 AT&T、Bell Lab,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还是规模方面都有了惊人的发展与提高。1987 年富士通报导研制成功  $4 \times 4$  GaAs 开关矩阵 OEIC 芯片,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发展 OEIC 的主要基地,据报导 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 1Gb/S 的光信息,还研制成功 1:8 OEIC 多路解复用器芯片,含有 250 个逻辑门,他们的目标是要发展 16:1/1:16 OEIC 时分复用与解复用系统。

AT&T、Bell Lab 致力于大规模全光开关矩阵的研制,依借他们首先发展的 SEED 光开关器件,已经完成了  $70 \times 70$  大型光开关矩阵,每个开关元素都辅有偏置电路,无疑这是朝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。

由上可见,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发展中将发挥极为重要的作用。

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 mW 量级,正在积极研究的量子箱结构激光器其功耗有望降到  $10 \mu\text{W}$  (微瓦)量级,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。而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。同样亚微米介质光栅具有多功能的特点。例如,光栅可以做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,可以做分路、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可以使 OEIC 在纵向和横向加工上都获得很高的工艺兼容性。

无论从技术的成熟性或经济效益来考虑,未来的大规模 OEIC 都将会尽量采用以 Si 材料为基质、GaAs 或 Inp (磷化铟)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。微电子技术、两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。最近报导在硅衬底上用 MBE 生长的单量子阱激光器,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、有代变性应用前景的若干 OEIC 集成系统

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,因而集成工艺的复杂性和难度要大得多。无论从经济效益还是技术代价的角度来考虑,人们不会过早地追求集成规模很大 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作出贡献。

#### 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,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波导中而与传输光纤高效率地耦合输出,再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还是经济的角度来考虑都是不可取的。

时分复用技术则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。每个光开关元素都要通过波导交叉连接组成复杂的开关网络,同时每个开关还辅有相应偏置电路,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

目前直接强度检测的 PCM 光通信系统,光发射机比接收机显得复杂。但对相干光通信



系统而言,接收机的复杂性和难度都比发射机要更大。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,由光电探测器接收并馈入光频差分放大器,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 光源有两个优点,其一是因为对 GaAs 发射的近红外波长辐射,集成化接收机可以由完全成熟的 Si 器件与电路来实现;其二是 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 Si 器件与电路来执行,经济上很适宜。由于 Si 基片上制备低功耗的量子阱激光器已得到重要突破, GaAs/Si 高速光发射机的研制已指日可待,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普通家庭,系统造价的降低和可靠性的提高就显得尤为重要。解决的途径只有通过 OEIC 来实现,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庭,1/3 以上的光收发机将为 OEIC 芯片所代替。人们还预测 3—5 年后 OEIC 收发机将大量实用化,1991 年全世界 OEIC 收发机产值将可能达到 2500 万美元,而 1996 年则将增至 5 亿美元,到 2000 年达到 18 亿美元。由此可见,光通信技术的普遍实用化有赖于 OEIC 技术的成熟与发展,它将成为未来光通信产业发展的关键。

### 四、发展对策与措施建议

我国光通信发展工作起步于 1972 年。中国科学院半导体所、上海硅酸盐所和福建物构所都做出过积极的贡献。1975 年国家就认识到光通信技术的重要性,开始全面制定发展规划。此后在“六五”、“七五”期间,光通信研究和开发一直列为国家重点攻关项目。政府及产业部门、地方都投入了相当的资金和力量。时至今日,我国光通信发展已到相当的规模,有若干条实用化通信线路已开通运行。

然而,我国光通信技术的开发,目前基本还处于初期阶段,与国际水平的差距至少 10 年。尤其在 OEIC 研究开发方面(如技术条件、课题布局和队伍素质等)差距更大。

正是考虑到光通信在未来信息化社会中的显赫地位和 OEIC 的重要性,国家在高新技术发展规划中安排了“光电子、微电子与系统集成技术”等主题项目,集中力量建立了光电子器件工艺中心,进行了跟踪与发展的部署。

OEIC 的研究范围,极为广泛。鉴于我国国力有限,没有必要也不可能全面铺开。我们应该在周密分析国外发展动向的基础上,结合我国光通信事业发展的部署与需求,选定对全局有带动性的有限目标(如相干光通信技术)作为主攻方向,力争尽快有所突破。只有明确应用目

标之后,才可能恰当地部署研究课题,制定技术路线,筹集设备条件。否则,就有迷失航向,贻误时机的危险。

应用目标选定之后,关键就是人才队伍和实验条件。

应该选择一个确有实力和条件的单位(研究所或实验室)作为依托单位,加以充实和扩大,集中有限的财力物力,建设一个现代化的 OEIC 配套工艺实验室,把我们的工作起点放在 80 年代的基准上。

OEIC 集中了光电子和微电子技术的精华与难度。微电子技术的成就,无疑对促进 OEIC 的发展是很重要的借鉴。当前应注意及早转移一部分微电子的精干力量,充实到 OEIC 的队伍中来,加快发展步伐。同时,还要注意组织一部分熟悉系统应用和 CAD 工作的人才,参与 OEIC 的设计研究工作。OEIC 是一门新的交叉技术科学,吸引和培养年青一代优秀人才也是当务之急。

OEIC 的工作既有器件与工艺问题及基础科学问题,又有明确的系统应用背景和未来产业开发的需求。因此,OEIC 的研究开发工作,一开始就应当注意采取研究与应用密切结合以尽快形成规模产业和实现良性循环,以及有助于研究与开发人才双向流动的一种新的组织模式。这种组织模式,可以是一种新型的技术研究与产业开发并举而又密切结合的工程研究开发中心。

我们不仅在工作中要注意尽量引发新思想,采用新技术,在组织管理上也应当采用新的运行机制,以求更好地提高工作效率,缩短研究周期,加快成果推广,促进人才成长。只有这样,经过相当一段时间的艰苦努力,才可能使我国 OEIC 的研究与开发赶上国际先进水平,迎接未来全球性光通信产业的发展与竞争。