

21 世纪的光学和光电子学讲座

第三讲 信息网络与半导体光电子学*

吴荣汉

(中国科学院半导体研究所 北京 100083)

摘要 文章从光信息的传输、交换与处理、存储与读出、获取与显示等重要技术领域的发展,介绍了半导体信息光电子学的现状以及在未来信息网络发展中的关键地位。

关键词 半导体光电子器件,光信息网络

SEMICONDUCTOR OPTOELECTRONICS AND INFORMATION NETWORKS

WU Rong-Han

(Institute of semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Abstract The state of the art and key role of semiconductor optoelectronics are reviewed with regard to the future development of the transport, switching, processing, storage and read out, as well as gating and display of information in advanced optical information networks.

Key words semiconductor optoelectronic devices, optical information networks

1 引言

50年代发展起来的以半导体晶体管为核心的固态电子学及微电子学,是当代计算机科学技术、通信技术、自动控制技术和无线电电子技术等取得巨大成就的关键基础。经历了半个世纪的发展,半导体微电子学应用已深入到国民经济及军事应用的各个领域。可以认为没有微电子学的发展,就没有当代的信息科学技术。与日臻完善的微电子学相比,半导体光电子学起步较晚,但随着其本身的发展及信息技术的迫切需要,半导体光电子学也已成为当代信息科学技术领域的重要学科,在推动信息科学技术发展方面起着关键性和基础性的作用。光子学是研究光子作为信息和能量载体的科学,电子学则是研究电子作为信息和能量载体的科学。光电子学可以认为是电子学与光子学交叉形成的新兴学科,它以光子学研究为核心,以电子学研究为支撑。因此,半导体光电子学具有更多的光子学内涵。与信息微电子学比较而言,信息光子学的重要特点是高并行性、抗干扰、高带宽以及光波特性的(例如相位、偏振、波长等)的高度可用性等。随着人们对信息科学技术要求

的提高,信息光电子学的产生与发展成为很自然的事。标志着半导体光电子学的兴起的最重要的事件是60年代初半导体激光器的问世,以及70年代初在信息领域发挥重大作用的室温连续运作的半导体激光器结合低损耗石英光纤对光纤通信发展作出的奠基性贡献。光纤通信的突破使通信技术从电子时代跨入光电子(光子)时代。近30年来,迅速发展的光电子(光子)技术逐步深入到信息技术特别是信息网络的各个方面,发挥着不可替代的作用,并随着时间的推移,这种作用将越来越明显。这些方面包括:超大容量信息流的传输;多媒体宽带综合服务信息交换;高密度信息量的存储;信息的超快实时处理;信息获取、读出与显示等。光电子(光子)技术具有很强的科学内涵和广阔的应用背景,并日益与微电子技术紧密结合、相互渗透、融为一体,成为进一步发展信息高技术产业的重要基础。目前,推动光电子科学技术发展应用的重要力量是信息网络的发展。其中最具代表性的是电信网、广播电视网和计算机三大网络融合成为统一的、综合的、多功能的、可传送

* 国家自然科学基金资助项目
1999-10-10收到

和交换所有类型信息资料的“信息高速公路”。全球化、全球化的宽带网必将对全球经济与政治产生极其深远的影响。此外,光电子技术一直也是保障国防安全的核心技术之一。因此,美国、日本以及欧洲的一些国家将光电子技术列入国家关键技术、国防关键技术加以优先发展。我国政府对其也十分重视,作为优先发展项目列入“863”等国家研究计划。

当代光电子技术的覆盖面很广,但在光电子技术中,半导体光电子学及相关器件有其独特的关键性基础地位,特别是在信息传输、交换、互连、处理、显示等方面。其原因在于,总的来说,半导体光电子器件具有高效率、高频率、低功耗、长寿命、高可靠性、多功能、微小尺寸、易集成、易批量低成本产出、易与电子器件特别是半导体微电子器件相兼容等特点,特别是在日臻完善的微电子工艺技术和先进的超薄层(最薄至纳米)半导体材料生长技术的支持下,在充分利用当代固体物理、半导体物理、激光与光学的研究成果的基础上,在信息技术的重大需求和广泛应用的推动下,近20年来,半导体光电子学取得了飞速发展,也将是新世纪重要产业之一,其重要性得到了越来越广泛的共识。

半导体光电子学的涉及面很广,限于篇幅,我们只简单地说明围绕在当今信息网络技术发展中起重要作用的半导体光电子学及相关器件。

2 超大容量传输与半导体光电子技术

以电子作为载体传输信息流由于技术性和经济性的原因,其传输量只能达到数百 Mb/s($1\text{ Mb/s} = 10^6\text{ b/s}$),难以满足未来信息社会 Tb/s($1\text{ Tb/s} = 10^{12}\text{ b/s}$)超大容量传输的需求。光信息传输具有高并行性、抗干扰、高带宽的特点。光波的本征带宽高达 200 THz,低损耗石英光纤在 $1.55\mu\text{m}$ 波长处的光纤传输窗口宽度也可达 25 THz,因此,未来超大容量信息传输采用以光子作载体的光电子技术已确信无疑。20 多年来,光通信技术的成功发展已充分证明了这一点。工作波长为 $1.55\mu\text{m}$ 的半导体 GaInAsP/InP 量子阱结构分布反馈(DFB)激光器(利用在器件内制备微小光栅形成光波选模振荡)是当前在长距离高频信号光纤传输系统中首选的光频发射源,在数千兆频率范围仍可保持动态单纵模工作,可避免长距离传输中色散延迟导致的波形畸变。在光通信系统中,单信道传输容量已达到 10 Gb/s。然而,由于受到啁啾频移噪音的限制(高频电注入引

起折射率变化导致的波长抖动),DFB 激光器的直接调制技术受到严重挑战。因此,为进一步提高单信道信息传输容量,除采用外加高速电光调制器的方法外,世界各国都在集中发展以 DFB 激光器稳态输出和半导体电光调制器(动态高频调制)为基础的发射源单片集成,以实现大容量单一波长信道($> 10\text{ Gb/s}$)或多个波长信道(数百 Gb/s)的传输运作。目前已研制成功发射 40 个不同波长和保持一定波长间距($\sim\text{nm}$)的 DFB 激光器和调制器的单片集成,可实现高码率的具有高并行性、抗干扰能力的多波长通道信息传输,即具有高码率的、而波长不同的信号在同一光纤中传输,使总码率达到数十 Gb/s 甚至超过 100 Gb/s。虽然,目前半导体电光调制器(主要利用低维半导体材料的量子限制斯塔克效应)的调制频率带宽高达 40 GC,但石英光纤的一些光学效应以及在高码率传输技术中所用电子系统经济性问题,使单波长信道传输 10 Gb/s 以上遇到困难(现在单信道已近 100 Gb/s,但造价太高)。要突破 10 Gb/s 的限制,最佳选择是多波长信道发射源集成。另一方面,寻求新的传输技术和激光器运作方式,例如光孤子传输及激光器锁模技术,则可能使单信道传输码率提高到 100 Gb/s。

Tb/s(10^{12} b/s)传输容量是未来信息化社会需求的标志,各种复用技术是实现如此高信息传输的有效途径,除上面提到的波分复用(WDM)技术外,还需结合光学时分复用技术(OTDM)来进一步扩充传输容量。波分复用是指在同一光纤中,同时传送不同波长的携带大量信息的光子载体,从而增大总的信息量;时分复用是指在同一信道中采用光学时钟技术,将同一波长的高密度信息光脉冲,按一定时间间隔提取作光载波使用。它既使高码率传输中的色散延迟得到改善,又增大总的传输信息量。

目前围绕扩大信道传输,重点发展涉及的半导体光电子器件是:高速率响应($> 10\text{ Gb/s}$)窄线宽(100kHz)多波长信道运作的半导体集成激光器(含相同材料系制备的电光调制器);用作全光中继的半导体激光泵浦的掺 Er 光纤放大器(EDFA);用于波分复用和解复用的波导光栅阵列(AWG)等。波分复用和解复用是指在发射端将不同波长信道的光合起来,进入单模光纤,在接收端按波长将信道分开。基本原理是采用色散元件分光。波分复用和解复用是可逆的。目前,利用半导体薄层生长技术、平面工艺技术和光栅色散原理制备的 72 路脊形波导波分复用和解复用器已见报道。随着发射源的高度集成化,

光纤中所需的无源器件的类别、功能、质量、数量要求将大为提高(如分束、合束、隔离、衰减、耦合、滤波、延迟等)。对于这些无源器件,共同要求是具有低的传输损耗和插入损耗,并与偏振无关,具有小尺寸、波长均匀性、高可靠性、易集成、低成本等特点。因此,在充分重视发展有源器件的同时,必须大力发展无源器件。从半导体光电子器件发展的长远考虑,作为波分复用光源的窄线宽、可调谐半导体激光器和作为光孤子激发源的高重复频率超短脉冲(ps)半导体锁模激光器及集成技术,半导体复用和解复用器特别是 SiO₂/Si 基 AWG 的发展将是未来发展 Tb/s 传输技术的关键基础。

3 信息交换、互连网络与半导体光电子技术

信息快速入网和出网的分派能力决定系统所传输的巨大信息量能实时利用的有效性,也是对主干道传输潜力充分利用的决定因素。它包含传输网络中信息的上、下路由,结点间的信息交换,以及交叉互连等关键环节。

光交换分配分 3 个层次,即城域间的干线网,城域内的局域网和用户间的用户接入网。每个网均由传输线与节点组成。通过节点实现信息路由选择,互联和交换。光信息交换模式可以有空间分配交换、时间分配交换、波长分配交换等。目前比较通行的方案是波分和空分。他们的组合构成有路由识别、上路、下路、交叉互连和自愈修复等复杂功能的智能化网络信息交换体系。该体系所用光电子器件主要有光开关、波长变换器、复用和解复用器及其集成部件等。但基本单元是光开关。不同的网络(干线网、局域网和用户接入网)对光开关的响应速度要求不同,可以从 ms(干线网)直到低于 ns(接入网)。利用半导体低维结构材料激子的电光及光学效应或其他效应,其开关速度可低于 ns,甚至达到 ps,比基于其他物理效应(如电磁、热光、声光)的器件要快得多。一般而言,在系统应用中,要求光开关及列阵响应速度快、插入损耗小、功耗低、尺寸小、易集成、高稳定性,具有较强的与其他器件兼容的能力。这些要求都是半导体器件具有的优势。从发展来看,制备高速半导体电光开关、光光开关及其集成面阵是实现快速光交换的主要途径。

相对于光传输网络系统中的半导体光电子器件(如发射波长为 1.3 μ m 及 1.55 μ m 分布反馈激光器及法布里-珀罗激光器、高速探测器、光纤放大器

等,根据不同的网系传输量,采用具有不同频率、功率要求的器件)而言,用于光交换、互连中的器件的研制尚待进一步加速开发,以满足实际的需求。目前,这方面研究与开发的器件有:

(1) III-V 族半导体光波导开关列阵(利用电场相位调制导致强度调制)。其优点是响应快、功耗低、易面阵集成,但尺寸大、插入损耗大;

(2) 半导体光放大器(SOA)。它兼具开关和放大功能,是当前研究的重要方向,特别是发展应变补偿、偏振中性的 SOA 器件更属急需。目前,主要材料为 GaInAsP 等。半导体光放大器还具有宽带可调谐波长变换的功能,目前,其带宽可达 100nm。在光纤波分复用网络系统中,采用给定波长间距(例如 0.8nm)作为庞大用户群分别使用的信道的标志,因此半导体光放大器作为宽带可调谐波长变换器用于交换网络是很有前途的。与此相对应,开拓高速可调谐波长探测器也属于配套的相应要求。

(3) 硅基波导光开关列阵。以硅为基底的 SiO₂ 波导开关列阵,它与硅微电子器件及工艺的兼容性强、成本低、易集成。高速 SiO₂ 电光调制波导开关列阵是当前研究的前沿课题,极受重视。但要解决的主要问题是提高电光系数,解决制备 SiO₂ 波导开关的特殊工艺难点。

为了实现对多个波长信息的分流与汇合,发展硅基密集波导光栅阵列(AWG)以用于信息复用和解复用,具有重要意义和实用价值。

以 Si 为衬底的有机聚合物波导开关具有电光系数大、调制带宽大(已达 100GHz)、低成本、易集成、可塑性强、材料选择性及制备工艺灵活性大,与其他光电子及电子器件兼容性强,是一类很有发展前景的波导开关列阵。其主要问题是稳定性需要提高。

(4) 发展具有逻辑功能的光开关集成更是智能化光信息入网与交换的需要,光双稳开关符合这一要求。利用半导体低维结构中激子非线性效应[例如自电光效应(SEED)]制备的光开关逻辑器件,具有极低能耗、反向 p-n 结工作的特性、高开启速度(< ns)、多功能性(多种光逻辑、接收、调制等)、易集成、可三维空间运作等特点。该器件光窗口垂直集成表面,利于大规模集成并行操作。通过与高速电子器件的多芯片组装(MCM)或单片功能集成,形成具有集光学输入、输出、多种光学和电学逻辑开关处理功能为一体的智能化芯片,被称为灵巧像素(smart pixel),目前已经研制出 4352 个光输入/输出端口的

256 × 256 的 SEED - CMOS 智能像元集成芯片。SEED 由 GaAs 量子阱材料制备, CMOS 采用商用微电子芯片。SEED 器件的集成度可以很高, 速度很快, 所构成的灵巧像素的时间限制主要取决于电子芯片。集成化的 SEED - CMOS 灵巧像素是真正将微光子器件(受光面积 $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$) 与微电子器件大规模集成的光电子芯片的典型范例, 在自由空间交换互连实验中, 取得成功。但该器件是无源被动式工作, 需要外加光源匹配。目前, 利用新一代的半导体激光器——垂直腔面激光器(VCSEL) 面阵与微电子芯片集成构成灵巧像素, 是很具有开发价值和前景的光电子集成。该激光器发光方向不同于一般激光器的侧向出光, 而是正面(垂直于集成表面) 发光, 极利于高密度集成以及与光纤阵列及探测阵列耦合, 是具有高并行性、高密度运作的极为看好的发射源。VCSEL 具有极低的阈值电流(已达 $100\mu\text{A}$), 发散角小($<10^0 \times 10^0$), 微型结构($10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$), 高带宽(70GHz)、易平面集成, 以及与其他光电器件兼容性好的优点, 无论从单元器件或集成化方面来说, 都是当前半导体光电子器件中极受瞩目的前沿课题, 特别是随着工艺水平的进一步提高, 该器件工作体积可以达到与其发射波长相比拟的尺寸, 因此, 可以导致一系列涉及微光学腔体的新物理效应和新器件出现。VCSEL 作为高密度集成的交换、互连元件, 要求其功耗进一步降低(由 $100\mu\text{A}$ 级降至数微安), 阵列规模进一步扩大(目前总数在 100 范围), 寿命可靠性(目前寿命达 10^4h 以上) 进一步提高, 激光波长拓展到光通信波长($1.3 - 1.55\mu\text{m}$)。因此, 目前尚未达到广泛应用水平。但无论从光信息传输、交换、互连、信息处理方面, 其应用前景都是很广阔的。进一步的研究表明, 有望将规模化的 SEED 类器件与 VCSEL 相结合, 充分发挥 SEED 的多功能大规模集成的优势, 利用 VCSEL 作阵列光源, 构成新的灵巧像素, 发展成有逻辑功能、高速运作的智能集成化的大规模全光交换互连模块。

VCSEL 和 SEED 类器件及集成是今后发展光交换互连, 特别是高并行性的空间光交换互连的主导器件。

此外, VCSEL 器件具有很强的模式选择作用, 在利用 VCSEL 器件作为发射源的同时, 在反向偏置下, 可以作为有较高灵敏度的共振腔探测器(已实现在 7nm 波长宽度下, 平均灵敏度为 0.25A/W , 峰值灵敏度可达 0.5A/W)。因此, 充分利用 VCSEL 结

构同时作为发射源及接收器的集成化阵列是值得研究的。

在提高光纤传输容量和高速交换的同时, 快速的信息处理离不开以计算机为核心的系统。光信息的高并行传输和交换功能, 要求计算机有更高的运算处理速度。目前, 以电子为载体的计算机运行速度受到 RC 参数延迟效应的限制(为 ns 量级), 导致超快信息流传输中的瓶颈效应。因此, 电子计算机最快运行速度未能突破 10 亿次/s 的限制。有必要发展计算机芯片内、芯片间、插板间的平面及空间(以及光纤)光互连和光波导光互连。要求这种光互连有高度并行、寻址和记忆等功能。因此, 有电光寻址和逻辑功能的 SEED 空间光调制器, 极低阈值电流(μA) 的微腔面发射激光器(微米尺寸) 很有可能在这方面发挥重要作用, 将大大推进逻辑运算、信息处理和人工智能的发展。

由此可见, 相对于光信息传输器件来说, 光信息的交换、互连技术器件的发展, 不如光信息传输的发展快, 也具有更大的复杂性和难度。有必要在这方面加强研究与开发的力度。否则将影响整个光信息技术的发展进程。

4 信息获取、存储、显示与半导体光电子学

信息的获取也称为传感技术。传感技术覆盖面很广, 例如对光场、热场、声场、应力场等的探测。作为光信息网络, 对信息获取的要求是信息的实时性、多功能性和安全可靠。在广泛利用现有传感技术于光纤信息网络的同时, 光纤光栅传感器是目前急需发展的传感器。通过光场、热场、应力场等对光纤光学折射率的作用, 改变用光纤制备的光栅周期波长, 用折射率的灵敏变化, 实现高速探测极微弱场的信号的目的。

光纤光栅除用作传感器外, 还在光纤信息传输中的色散补偿、激光器光谱线宽压缩、稳定波长、光学滤波等方面有广泛应用。进一步的发展要求解决其稳定性和特殊工艺难点。

除了信息的快速获取、传输、处理、交换外, 信息的超量存储和快速读出及显示也是完整的现代化信息网络所必需的。它表征信息共享的程度。

作为当前广泛使用的磁盘技术, 由于存储素元难于进一步缩小, 单盘存储量限于 100 Mb。光子技术是大幅度提高信息存储量的首选方案。其原因在于存储量决定于记录介质写入位尺寸和写读斑的大

小.采用短波长半导体激光器,可以大幅度降低介质光斑的大小,提高存取容量.目前,选用波长为780nm和650nm的激光器,采用复膜技术及双光头分别写读技术,已使存储容量达到数Gb范围.为进一步提高存储容量,一方面使用更短波长的激光器,并进行光斑压缩;另一方面改进存储介质和存储方式.在激光器方面,最令人瞩目的是新近发展起来的半导体GaN激光器.采用异质量子阱结构,可以使激光器的波长短至350—450nm,即蓝紫光范围.由于光斑尺寸与波长的平方成反比,因此,相对于目前常用的780nm和650nm激光器,其存储密度可提高到18Gb至36Gb(双层),甚至达到50Gb,其巨大存储容量则为目前双面双层DVD光盘的10倍.这是极为诱人的目标.对于波长为350nm或更短的激光器,按一个波长来考虑其光斑线度,则存储介质因光激发所导致的电子、空穴弥散串扰变得突出.因此,寻求高度局域化的光折变介质研究变得十分迫切.高灵敏度光折变材料(含半导体材料)和三维全息技术的应用是使存储密度达到100Gb以上直到Tb量级的重要研究课题.这样,信息存取成为不同深度和角度存取的立体模式.与此同时,发展新型的集成激光器面阵(例如微腔面发射激光器)和高密度半导体低维结构高速空间光调制器集成将进一步推动超大容量存储技术的发展.

随着信息化社会的发展,高质量的信息显示也变得十分重要和复杂起来.高速显示技术也随之日新月异地得以迅速发展.它不再是单纯的信息显示,而是多媒体系统、人机界面的关键硬件.

人们要求信息显示系统具有高清晰度、高速响应、平面化、集成化、全色化、袖珍化或超大型化、低成本等优点.除了已有的电荷存储阵列(CCD)及液晶显示(LCD)仍处于继续发展的状态外,开拓具有高速、高亮度、低功耗、低成本、大面积集成的以半导体红、绿、蓝三基色发光二极管组成的全色显示体系,对推动显示技术在国民经济和国防建设的应用将发挥重大作用.近年来GaInAlP, GaInN半导体发光器件已能将波长覆盖红、绿、蓝各波段,而且,发展速度十分惊人.超高亮度(数百毫cd以上)半导体全色显示已经实现.进一步降低成本和大规模产业化将是未来世界各国争夺广阔市场的重点.

此外,具有可塑性强、波长可调性强、轻便、低成本的有机聚合物膜与GaN基LED结合,在一般亮度范围(毫cd)的全色显示方面,在未来也将充分发挥作用.

5 结束语

近年来,以光通信技术为先导和主要标志的半导体光子学技术(光电子学)的飞速发展和进入信息网络系统,大大加快了信息化社会到来的速度.随着信息量的传送、交换、处理逐年成倍地增加,现在谈论信息化社会变得现实起来.高码率(Tb/s)信息流的传输、交换处理与存储将是信息化社会的关键基础.光电子技术,特别是半导体光电子及集成技术是实现此宏大目标的不可替代的手段.窄线宽高码率半导体集成激光器是发展密集波分复用与时分复用大容量信息传输的基础.偏振中性SOA光开关阵列,VCSEL激光器面阵,SEED光逻辑面阵,多芯片组装或单片集成灵巧像素,波导光栅阵列是发展各类(波分、时分、空分)高并行光交换、光互连.提高计算机运算速度和发展超大容量全息存储技术的关键.短波段半导体高亮度发光器件及激光器(红、绿、蓝、紫或更短波长)的发展将使超高密度光存储技术和显示技术(如中远距离全色大屏幕等)取得重大突破.

值得指出的是,光电子技术与微电子技术发展相类似,一方面,要充分利用和发展各种物理研究成果;另一方面,先进的材料生长和工艺技术的改进和提高,是实现各种器件功能的关键.实际上,上面提到的各类器件,在原理上和原型性器件研制上,都取得一定成功,但在将这些器件推向应用和产业化方面,都会遇到很多工艺难题.因此,必须充分认识材料和工艺新技术对发展光电子科学技术的极大重要性.

此外,从更长远考虑,在充分结合微电子技术发展光子学(光电子学)的同时,进一步探索全光网络(含全光计算机),是人类社会信息时代追求的更高目标.

总的来说,针对信息网络结构所需的半导体光电子学基础器件的轮廓已经基本清楚,两者关系已经明确.半导体光电子学的下一步将是充分考虑各种级别的应用信息网络的需求,开拓、发展、完善其所需的半导体光电子器件.在加速其产业化的同时,沿着高速、大容量、低功耗、高稳定性、多功能集成化的方向进行创新性、前瞻性、基础性的研究.伴随着半导体光电子学的日新月异的发展,将导致信息技术领域产生重大的飞跃.

感谢王启明院士为本文提供了素材,并进行了有益的讨论,深表谢意.