

信息高科技领域中的半导体光电子学

王启明

(中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点联合实验室 北京 100083)

摘要 本文从信息传输与处理、入网与交换、存储与读出、获取与显示等重要技术领域评述介绍了当代信息高科技的最新进展与未来的需求,着重揭示半导体光电子学在未来信息高科技发展中的关键作用与地位,以及当今研究与发展的主流方向

EEACC: 7240, 7220

1 引言

五十年代发展起来的固态电子学及微电子学的成就引发了世界范围内的第一次信息技术革命,已成为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。光电子技术的诞生归功于六十年代初半导体激光器的问世,尤其是七十年代初低损耗石英光纤和连续波运作半导体激光器的成就对光纤通信技术的发展作出了奠基性的贡献,使通信技术的发展从电子时代跨入光电子时代。时至今日,光电子(或光子)技术的迅速发展,已掺入到信息技术领域的各个方面,作为电子技术的延伸和发展,它已取得了众人瞩目不可替代的巨大成就。众所周知,超大容量信息流量的传输需要光电子技术,多媒体宽带综合服务的信息交换互连网络需要光电子技术,高密度信息量的存储需要光电子技术,信息的超快实时处理需要光电子技术,信息的获取读出、显示需要光电子技术等。由此可见,光电子技术已是当今信息高科技发展的主流之一和热点课题,它将与微电子技术相辅相成,直至互相渗入融为一体。

2 超大容量信息传输领域的光电子技术

电磁波(或电子)作载体来传输信息流由于技术上和造价上的原因已走到它的局限,即便采用代价很高的同轴电缆,其传输容量也只能做到 50MHz,难以满足未来 Tb/s 超大容量传输的需求。光波的本征带宽高达 200THz,低损耗石英光纤 1.55 μm 波长处的窗口带宽也可达 25THz,因此未来超大容量信息传输领域采用光电子技术已确信无疑。二十多年来光通信技术的成功发展已在信息传输领域中确立了不可替代强有力的地位。

目前工程铺设的光纤通信系统其单信息传输容量已达 10Gb/s, 1.55 μm 波长 InGaAsP 量子阱DFB 半导体激光器是首选的理想光源,然而直接调制技术由于受到啁啾频移噪声的限制,目前大多采用DFB 激光器与量子阱EA 电光调制器单片集成的光源,其最高调制带宽已达 40GHz,但由于石英光纤在 1.55 μm 波长处的色散率为 2ps/nm \cdot km。对于 10Gb/s 的传输码率相应的码宽已达 100ps,即使DFB 激光器线宽

* 国家自然科学基金资助重大项目,项目号: 69896260

王启明 男,1934 年出生,研究员,中国科学院院士,主要从事半导体与光电子学研究
1998-05-07 收到本文

能做到 0.01nm , 则 100km 传输距离下色散延迟已达 2ps , 而实际上在长途光纤干线中的传输由于非线性效应及其他效应的存在, 谱线展宽在所难免, 因此企望突破 10Gb/s 的单信道传输容量遇到了困难

光孤子传输技术是克服上述局限提高传输容量的途径之一. 利用光纤非线性产生的自相位调制, 自洽补偿 $1.55\mu\text{m}$ 窗口波长光纤的反常色散, 在一定脉宽 ($\sim 10\text{ps}$) 和足够强的入纤光功率 ($> 16\text{mW}$) 条件下可以实现无延迟的光孤子传输. 增益开头 MQW DFB 半导体激光器能够产生 10GHz , ps 光脉冲^[3]被认为是比较理想的实用化的激发光孤子的光源. 但对这种内调制工作模式, 频移啁啾效应仍不可避免, 它将引起光孤子的不稳定, 企望突破 10Gb/s 的局限也是困难的. 量子阱 DFB 激光器与 EA 电光调制器的集成, 可在 40GHz 重复频率下, 产生 ps 光脉冲, 因而可使光孤子的传输码率推进到 40Gb/s . 更高重复率 (100GHz) 光孤子的激发, 必须利用锁模技术来实现, 量子阱半导体锁模激光器是最实用化的一类.

利用碰撞锁模技术可以得到更窄的光脉冲串. 已有报道获得 0.64ps 350GHz 的光脉冲输出, 这是一类集成激光器, 器件结构和工艺过程都很复杂, 造价很高. 然而就光孤子通信的发展看来, 100Gb/s 的高码率传输也已到了局限, 因为在如此高码率的传输中光纤的双折射效应产生的极化色散的影响已不可避免, 要想突破此局限反而必须引入色散补偿技术. 由此看来, 光孤子传输实用化的最高传输码率应标定为 100Gb/s . 被动式量子阱锁模激光器则成为高速率光信息传输技术的关键.

Tb/s (1000Gb/s) 传输容量是未来信息化社会需求的标志, 相差还有一个量级, 复用传输技术的采用是突破这一局限的途径. 主要有时分复用 (TDM) 和波分复用 (WDM) 二类. 时分复用是利用光学时钟技术, 把高度密集的光脉冲按一定时分的等间隔序列 (如 10 等分) 提取出作为光载波使用, 这就使得时分后的每个脉冲序列中的脉冲间隔扩大了 10 倍, 色散延迟的影响也相应减弱了 10 倍.

时分复用高码率传输技术的发展寄希望于实用化半导体碰撞锁模激光器. 然而 Tb/s 超大容量信息的传输光脉冲宽度将要压窄到 100fs 以下, 这不仅在激光技术方面而且在电学调制技术方面难度都很大, 造价也很高. 波分复用提供了一条更为重要扩充传输容量的途径. 石英光纤 $1.55\mu\text{m}$ 波长的最低损耗窗口带宽高达 25THz ($\sim 20000\text{nm}$). 如果选取信道的间隔为 100nm , 那么就可以有 200 个可供复用传输的信道, 其扩充传输容量的潜力可以达到 ($20\sim 40$) Tb/s 以上. 波长稳定精确可控的光源是实现波分复用的关键. 量子阱结构可调谐 DFB 或 DBR 长波长 ($1.55\mu\text{m}$) 半导体激光器的成功发展已为波分复用超大容量传输技术的发展奠定了基础, 目前的关键是把分别运行的诸多波长的 DBR 或 DFB 半导体激光器集成在一个很小的基片上, 以便于实现与单模光纤的高效率耦合, 而彼此间又互不串扰. 由于 WDM 技术对各信道光源的波长精确度要求很高, 这就使得在研制这种 WDM 集成光源时技术难度很大, 产品的成品率低, 造价高, 使用时对芯片各部位温控的一致性也有很高要求, 因此 10 路以上的集成光源也未必合乎实际需求. 再则由于四波混频效应的影响, 波分复用的密集度也有一定的限制. WDM 技术和 OTDM 技术的结合, 将是扩充传输容量的可行途径, 同时对特定系统的实用性与经济性提供了优化选择的机会. SiO_2/Si 波导光栅阵列 (AWG) 的成功发展为密集波分复用 (DWDM) 技术的实用化发展提供了另一重要坦途. AWG 兼有复用与解复用的对称功能, 比光纤星形耦合器稳定可靠体积又小, 复用路数几乎不受限制, 而各信道不同波长的光源, 则可单独精确控制与运作, 这就使得系统造价大为降低. 超大容量传输技术的发展涉及到许多重要的光电子技术. 例如高速率响应 (100GHz)、窄线宽 (100kHz) 集成化半导体激光器, 用作全光中继的半导体激光泵浦的掺 Er 光纤放大器 (EDFA)、波导光栅阵列波分复用与解复用器. 而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率 ps 脉冲半导体锁模激光器及其集成化技术以及 SiO_2/Si AWG 的发展无疑将是发展 Tb/s 超大容量传输技术的关键基础.

3 信息交换、互连网络中的光电子技术

未来的信息传输系统必将是一个有高智能度、复杂而又灵活的网络体系, 能够满足对多部门和千家万户及时准确提供所需信息的能力. 信息的快速入网和分派能力决定了巨大信息传输量实时利用的有效性. 也是对主干道的超大容量传输潜力充分利用的决定因素. 光信息的交换有三个层次, 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, 每个网都是由传输线和节点所组成, 通过节点实现信息的路由选择, 互连和上下路的交换功能。干线的光交换类似于信道切换的功能, $m s$ 的响应即能满足要求, 城域间的交换内涵比较复杂, 尤其在将来多媒体化的宽带数字综合服务网中, 既有区域间的信道切换, 又有信息的提取分派与接入, 因此区域网的交换速度应该比干线网的交换速度快得多, 例如提高到 $\mu s \sim n s$ 的量级。至于对超大容量时分复用系统和计算机数据流的传输网络的交换速度就有更高的要求, 如 $< n s$ 甚至达到 $p s$ 。光交换系统的基本单元就是光开关, 光开关的类别依物理效应区分有电磁开关、热光开关、声光开关、电光开关、激子电吸收(EA)开关以及环形镜光纤开关等, 电磁开关响应速度慢($< m s$), 热、声、电光开关都是通过热场、声场、电场引入基质材料折射率的变化来实现的, 热光效应的响应时间为 $m s$ 量级, 声光则为 μs , 电光可接近 $10 n s$, 而激子的 EA 开关可 $< n s$ 。光交换模式可以有空分交换、时分交换、波分交换等。空分交换和波分交换则比较通行的方案, 空分交换与波分交换的组合则构成了具有路由识别, 上路、下路、交叉互连和自愈修复等复杂功能的智能化全光网络信息交换体系。构成这一体系的光电子技术主要有光开关、波长变换器和复用与解复用器件及其集成化。

超高信息流量的快速入网与交换要求光开关有很快的响应速度, 电光开关能够达到 $n s$, 光光开关则有可能更快。因此电光开关和光光开关及其集成面阵的发展是实现快速光交换的重要途径。

半导体 III-V 材料的 Mach-Zehnder 型的波导光开关已经有了比较成熟的研究, 它有快的响应和比较低的功耗, 并能与 III-V 电路工艺兼容做成单片集成开关面阵, 但尺寸和插入损耗仍比较大。对于大规模多址光交换系统仍然有其限制。半导体光放大器(SOA)可以实现兼具增益和开关的功能, 这是它独有的优点, 是当前一个重要的研究方向, 通常的半导体光放大器有源层是由应变量子阱材料做成的, 光放大特性与偏振态有关, 因此需要发展应变补偿的偏振中性的 SOA 光开关。

而从实用性和经济性考虑, 则寄希望于以 Si 为基质的光开关交换体系, 这就是正在迅速发展的 SiO_2/Si 波导光开关阵列, 由于它完全能与 Si 微电子工艺兼容, 因而能够实现廉价的全 Si 化单片光交换集成芯片, 然而体 SiO_2 的电光系数很小难以实现有效的电光调制效应, 也不能利用等离子效应调制其折射率, 目前的光开关是利用热致折变效应来改变 M-Z 干涉仪桥臂上的光程差而实现的, 但热致效应的响应速度仅为 $m s$ 左右, 因此 Si 基光开关尚只能用在干线交换网络中的信道切换。能用于局域网中的 Si 基高速电光开关无疑将是一个很重要的前沿研究课题, 有机聚合物材料有大的电光系数和快的响应速度, 可塑性强, 加工成本低, 又能够在较低温度下成膜在 Si 基片上, 因而有希望做成高速响应波导光开关, 并与微电子芯片实现准单片集成。无疑对实现廉价的高速光交换系统有很大的吸引力, 提高稳定性, 降低损耗则为其关键。

未来的智能化光信息入网与交换系统还要求光开系统有一定的逻辑功能, 半导体自电光效应 SEED 双稳态光开关满足了这一需求, 通过多芯片组装的 MCM 技术, SEED 器件还能实现三维空间的运作。SEED 器件与高速电子器件(如 HBT)集成构成的光电子集成芯片, 不仅能够提高开关灵敏度, 同时还能够扩充集成器件的功能, 例如电寻址的功能, 称此为灵巧像素(Smart pixel)。可见以 SEED 器件为基元的光子开关系统将可能发展为一种有逻辑功能智能化的高速运作的集成化的大规模全光交换系统。

一个复杂的网络系统对众多用户的服务, 要求具备有对用户信道的辨识功能, 以实现对用户准确无误的服务, 目前国际上已经公认可采用波长作为用户信道的标志, 并已制定了信道波长的国际标准, 石英光纤在 $1.55 \mu m$ 中心波长处的窗口带宽达 $25 THz (\sim 20000 nm)$ 如复用间隔为 $2 nm$, 则有 10000 路波长可提供用户使用, 因此在庞大的用户网中, 就必须配备有宽带可调谐波长变换器, 半导体光放大器目前带宽可达 $100 nm$, 有可能用于此目标的发展。相应的要求则是可调谐的波长选择光电探测器。为了实现对众多波长信息流的分离与汇合, SiO_2/Si 密集波导光栅阵列(AWG)复用与解复用器, 将对此作出重大的贡献。

4 信息处理系统中的光电子技术

电子计算机对信息的处理是通过一系列的逻辑运算来实现的。对 Tb/s 信息流的处理, 要求逻辑运算的速率达 1000 亿次/秒以上, 相当于每个逻辑门开关的运作时间为 $p s$ 量级, 虽然迄今半导体 MOS 器件的开关速度已能达到, 然而由于现行计算机中信息的载体是电子(或电流), 逻辑门之间的信息传递, 尤其是

芯片和插板之间信息的传递必须通过内部或外部引线作为电子载体传输的媒质,这就受到回路RC参数延迟效应的限制。在极大规模(10^8 gate/cm²)的门阵列芯片中器件的尺寸已缩小到亚微米量级,内部引线的阻值相应提高,延迟时间的局限为ns量级,这就导致了超快信息流传输中的瓶颈阻塞效应,电子计算机的最快运行速度未能突破5亿次/秒的门槛。

用光子(或光波)作为载体来传递逻辑运算的信息是突破瓶颈门槛的关键途径。光在半导体介质中的传播速度约为 10^{12} cm/s,走完一个厘米的光程只需ps的时间,而逻辑门间的距离又不足 10^{-2} cm,因此光互连技术将是提高电子计算机运算速度的最佳选择。

光互连有自由空间互连和波导互连二类。芯片间光互连可用自由空间互连来实现,插板之间的光互连,自由空间和光纤波导互连均可采用,芯片内部逻辑门之间的光互连则要求有实时电光转换功能器件和紧凑的互连通道,是有待进一步发展的复杂问题。无论是空间光互连或波导光互连,都要求在计算机的逻辑门阵列芯片上安置微型、低功耗、高速响应的半导体激光器,甚至在芯片上组构成一定规模的面阵。垂直腔面发射半导体激光器的成就为光互连技术的发展奠定了关键的基础。光互连技术的采用将不只是简单的面对面的连接,还必须充分利用光的基本特点,使之具有并行、寻址和记忆的功能,因此在互连光路中,还要插入用以并行分束的全息片,有电光寻址和逻辑功能的SEED空间光调制器以及光电转换的探测器面阵等,采用MCM多芯片组装技术对此可得到解决。至于芯片内部的光互连必须通过波导的导引来实现,SD₂和聚合物光波导已有成功的发展,采用低温涂覆乳胶后再经固化的技术可能是经济可行的一条途径。

光互连技术在电子神经网络系统上的应用尤为引人注目。

神经网络系统的特点在于它有高密度的交叉互连功能,每一个神经元的信息都可以同时发送予其他各个神经元,而同时又能接受任一个神经元发送的信息,因此神经网络系统具有高度联想、对比、模仿的功能。用VCSEL激光器和PD光探测器与神经元微电路做成微小的光电子神经素元,辅以计算机预先设计的全息反射片,能够实现神经元芯片内部或芯片之间的交叉光互连。高密度光互连的芯片中,由于VCSEL激光器是功率器件,芯片对热耗量有一定的承受度,因此把VCSEL的工作电流降低到 μ A量级将是进一步努力的方向,VCSEL的微腔化有助于达到这个目标。

光子技术在二维图象的信息处理中有重要的应用,例如在目标识别和跟踪制导方面,光学图象的信息处理的特点是快速实时性,然而通常这是一种模拟处理方式,精度不如数字化处理,以SEED为基础的灵巧象素空间光调制器是一种光子和电子功能结合的面阵器件,配上VCSEL面阵,模拟处理可与计算机数字处理结合,因而实现光学图象处理数字化,兼顾了实时性和高精度的要求,它将使识别跟踪系统的智能化程度进一步提高。可见,以VCSEL和SEED为代表的半导体光子学的发展将大大推动逻辑运算、信息处理和人工智能技术的新发展。

然而无论现在或是将来电子计算机的基础硬件将以Si微电子芯片为代表,而芯片光互连的诸多光源难以用GaAs VCSEL混合集成一起,因此发展Si基VCSEL器件具有深远的重大意义。然而Si为间接带隙材料,发光效率很低,响应又不快,近十年间曾有过许多努力,但仍未得到根本性突破,利用量子阱能带工程,在Si基材料中高浓度掺入稀土离子发光中心,在SiGe/Si体系中形成尺寸可控的量子点以及选择Si基适宜的异质材料系,实现子带间的光跃迁的量子级连效应,有可能最终实现Si基VCSEL激光器。无疑这将是一项极为引人注目的进展,它将使光电子技术与微电子技术在Si基片上融合统一,成为实现超高速光电子计算机的关键。

5 信息存储与读出领域中的光电子技术

一个完整的现代化信息系统除了具有超大容量信息流的传输和超快的处理与交换功能外,还包括对输入信息的超量存储和快速读出的能力,它展现出一个社会对信息资源能予共享的程度。磁盘存储技术已有相当成熟的发展,在影视、音响设备和计算机外部存储器中已得到应用。然而磁盘存储单元尺寸难以进一步缩小,单盘存储量很难突破10Mb的容量,对于以Tb/s为标志的现代化信息社会,存储器的容量也

应当提高到相应的水平。光子技术在存储技术中的引入为提高存储容量的发展开辟了一个更为广阔的天地。

光盘存储容量的提高取决于记录介质写入位元尺寸和写读光束的光斑大小。CD-ROM 是一种已在市场推出的只读型数字式音频记录光盘, 由于它用以读出的是 780nm 波长半导体激光源, 受到光斑尺寸和记录介质光学特性的限制, 它也只做到单盘 640Mb 的存储容量, 尚未能满足数字化视频信息的记录需求。

近几年来由于 650nm 和 630nm 半导体红光激光器的成功发展为光盘存储容量的扩大提供了新的机会。630nm 激光器的使用除了比 780nm 近红外激光器有更小的光斑尺寸, 使记录槽的间距由 $1.6\mu\text{m}$ 缩小为 $0.75\mu\text{m}$, 同时槽纹的凸起高度由 $0.83\mu\text{m}$ 降低为 $0.44\mu\text{m}$, 这就使得我们可以在一个面上涂上两层记录介质(分别 0.6mm) 而粘合在一起, 形成双层结构, 单面光盘中即可存入双层数据而可依序分别读出。人们称此类光盘为数字式视频光盘, 简称 DVD。DVD 光盘的单面双层存储容量预计 1998 年即可达 2.5Gb, 双面则达 5Gb, 一面光盘就可录下一部电影的信息。对于双层记录结构的采用就必须辅以程控替换的双焦距光学系统。双波长发射的激光器的使用则更为简便。

一般的 DVD 光盘也就是只读存储光盘(DVD-ROM), 它也可用作计算机上的固定存储器。随机存储器在计算机上则有更广泛的应用, 这就需要发展 DVD-RAM, 即可写读的数字光盘。这种光盘要求必须配有二种波长的半导体激光器, 或是双波长激光器, 并要求记录介质的吸收与反射对波长有很灵敏的选择性, 例如对现有 CD 光盘的记录介质 650nm 的红光有很强的吸收, 作为写入光源使用, 但必须具有比读出光源更大的功率(至少提高 5 倍以上)。780nm 光源则仍作为读出光源使用, 这样, DVD-RAM 的容量当然就不如 DVD-ROM, 关键是要寻求更合适的记录介质, 例如使它对 630nm 波长有强吸收而对 650nm 波长则有强反射, 这就达到 DVD-ROM 的同样存储容量。二个光头的分别使用在运作上毕竟是不方便的, 人们自然又寄希望于研究出一种双波长激光器, 而其中短波长谱份则有更高的输出功率。

GaN 和 ZnSe 蓝绿光激光器的问世对光盘容量的提高寄予了很大的希望, 蓝光波长为 415nm 的 GaN 基量子阱激光器运作寿命已超过一万小时, 它相对于 780nm 近红外光衍射局限的光斑尺寸小 3.5 倍, 因而单层存储容量可达 17.5Gb, 双层总容量则为 36Gb。GaN 基量子阱材料有可能研制成 350nm 紫外激光器, 则双层总容量可达 50Gb, 无疑这是极为引人的目标。然而存储位元的尺寸必须与光斑尺寸相匹配, 对 350nm 光斑面积大约 10^{-9}cm^2 , 线度约为 $0.3\mu\text{m}$, 为了防止光激发产生的电子、空穴的弥散串扰, 而必须有高度局域化的特性。新的有高度局域性记录介质的研究也是一个关键的课题。高灵敏光折变材料的研究可能是值得重视的一个重要方向。然而, 尽管如此, 离 Tb 的单盘存储容量尚有 20 倍的差距。

体全息存储技术是可达 Tb 位元超高存储容量的可选途径, 它是一种复用技术, 利用空间光调制器将被存储信息调制为“0”、“1”的明暗图象, 而与同步的参考光束会聚, 形成全息干涉条纹, 被记录在介质某一层面上。利用 Bragg 效应, 当改变参考光束的入射角时, 干涉图样将被记录在不同深度的介质层面, 如同书中的页片一样, 参考光束的不同入射角相应于不同的页片, 从而实现了信息的立体存储。有机高分子光折变材料和 LiNbO_3 光折变晶体都可用作此类记录介质, 有报道在 LiNbO_3 晶体中可以写入存储 10000 页的重叠的全息图象。这种立体存储的方法也称为角度复用。

角度扫描是立体存储技术的重要部分, 用机械扫描的方法, 速度和精度都满足不了更高的要求, 面发射激光器面阵的采用可以实现利用程控扫描快速切换不同位址(相当不同入射角度)器件的激射状态, 可以高速精确地实现角度复用的立体存储。立体全息存储的单体存储容量可达 Tb 量级。

半导体 SEED 空间光调制器和面发射 VCSEL 集成面阵, 在 $\phi 5$ 的基片上都可以集成上百万个器件单元, 甚至控调电路也可同时单片集成, 对其他类型的空间光调制器如液晶(LCD)空间光调制器则不可能做到。因此, 半导体集成光电子学将会推动实用化的超高容量存储技术的发展。

6 信息获取与显示领域中的光电子技术

信息的充分获取与载入是未来国家信息基础设施中的重要组成部分, 获取信息的技术也称为传感技术。信息反映着社会和物质的运动状态、社会状态, 可以通过声、图、文和数据的表达而反映出来, 物质的运

动状态则通常伴随有光场、热场、电磁场、声场和应力场等的出现,它们的存在可以使某种材料或器件的物理、化学参数产生一定的变化,通过这种变化觉察物质的存在和运动 这种器件即称为传感器

许多以光学、光电和光化学效应为基础的获取信息的手段,已为人们广泛使用 例如卫星上使用的红外遥感,红外焦平面雷达,CCD 摄像,计算机用的光笔、测温辐射计、星光夜视仪等等 这些技术都已相当成熟,并广泛投入使用 未来高度信息化的社会对获取信息的实时性和多功能性将会有更高的要求 以光纤为传感基质的光纤传感器正得到迅速的发展 它的基本原理是通过信息的各种辐射场,对光纤直接间接地产生应变,使光纤的折变率发生微小的变化 这种微小的变化,对传输光波的光程差或是光纤波导的漏泄损耗有明显影响 因而可以通过干涉效应和损耗特性觉察与获取各种信息 这种光纤传感技术有很高的灵敏度和很快的反应速度,能够接近实时化的要求,各种信息场都可导致对光纤折射率的影响,但又不受背景电磁场的干扰,因此光纤传感技术是一种多功能安全可靠传感技术,在许多设施中得到重要的应用,如飞行器上实时定位用的光纤陀螺、发电站安全测定电机和高压变压器中温升的光纤测温仪等 然而,由于信息辐射场对光纤折射率的改变量是很小的,几万分之一,通常需要很长的光纤卷在一起,以提高获取信息的强度,但这也带来很大的不便

利用在特殊掺 Ge 石英光纤对紫外光的光敏特性加以固化,可以在光纤上写入周期光纤,根据功能设计的要求可以是等周期的也可以是变周期的,用这种光纤光栅做成的 Bragg 反射器和滤波器其中心波长反射率高达 98.5%,而光纤长度却只有若干 mm 至多若干 cm,光纤光栅的反射率与中心波长的偏离度有很灵敏的关系,通过信息辐射场的作用可以引入对光纤长度的变化,从而改变光栅的周期,中心波长的移动将使传感光波的反射率产生灵敏的变化,通过反射率的变化感知信息的存在和运动 光纤光栅传感技术具有光纤传感技术的实时、多功能、安全可靠的获取特性,而且有更高的灵敏度,器件尺寸却有几个量级的减小

光纤光栅传感器的发展已受到极大的重视,人们期望把这种如此小巧的传感器埋入大楼的墙壁里,或安装在桥梁上,它能够实时反映大楼和桥梁的各种状态(如温度、负荷、应力等)及疲劳程度,人们称此为新一代智能化建筑材料

随着信息化社会的发展,用户接触的信息量将迅速膨胀,而人们的生活要求也越加丰富多彩,图象信息的传递与记录不仅是满足了人们影视娱乐的需求,同时也是未来电话电视会议和家庭办公,远距离操作所必需 图象信息不仅直观可靠,而且包含有无比丰富的信息量,无疑在未来世纪中它将很快进入办公室和家庭,与计算机联网使用 这就要求迅速发展价格便宜的台式小型图象扫描仪 现在的小型 CCD 摄像机已对此准备了条件 但是现在的 CCD 器件电荷转移速度太慢,必须提高到 ns 响应的水平,才能满足动态信息获取的需要 而在软、硬件上则要提高 A/D、D/A 转换的功能,造价也要大幅度降低,以达到用户可承受的程度

信息读出的终端要以某种形态体现,如以文字、声音和图象 图象体现包含有大量的丰富的信息内容,今天的图象显示器件的作用已不再是单纯的信息显示,而是多媒体系统与人们沟通的人-机界面的关键硬件

未来多媒体信息社会的显示系统要求具备高清晰度、全色度和平面化 屏幕尺寸则向袖珍型和超大型二个极端发展,袖珍型显示满足个人携带的需要,要求分辨高、像素尺寸小,而超大屏幕显示则要求能在很大的面积上制备出高亮度显示屏 因此必须发展薄膜化平面显示技术

虽然液晶显示 LCD 技术以及等离子显示 PDP 技术已成为产品,应用在个人机和电视机显示系统中,但是在亮度以及显示屏的扩大方面尚未能充分满足要求 有希望满足要求的技术就是半导体发光二极管显示器和有机聚合物发光显示

半导体红光 LED 已在 GaAsP 和 GaAlAs 材料系得到实现 绿光 LED 则在 GaP 系和 InGaIP 系得到实现,蓝光的 LED 最近几年分别在 ZnSe、SiC 和 GaN 材料上得到突破 可以说半导体 LED 显示技术已经具备了全色显示的条件 随着量子阱结构对材料特性的人工优化,半导体发光二极管的亮度正在迅速提高,例如对 $\Phi 5\mu\text{m}$ 的面积在 20mA 下运作, GaAlAs 系红光 LED 亮度可达 1000mcd, InGaIP 绿光 LED 亮

度可达 2000mcd, 而 InGaN 蓝光 LED 则达到了 4500mcd 这种高亮度的半导体发光二极管, 尤其适应于户外的中远距离大屏幕显示, 提高发光二极管的亮度是人们努力的目标

自从 1990 年英国剑桥大学 Cavendish 实验室第一次从有机聚合物材料中观察到微弱的黄绿色辉光开始, 人们立即引起了对有机聚合物发光显示的巨大兴趣 有机聚合物轻便、可塑性强、价格便宜, 并且具有和无机半导体相似的电子型或空穴型导电, 因而也可以做出 p-n 结 如能做成有效的 LED, 无疑在光显示技术应用中有强大的竞争力 科学家们通过人工调整聚合物链上的不同单元的相对浓度, 可以实现连续改变聚合物的电子态能隙, 从而可以获得从红~ 蓝各种波长的发光, 而满足全色显示的需求 关键是发光效率、亮度和关系到使用寿命的材料稳定性 许多近代半导体异质结、量子阱和光学微腔的设计思想已迅速地在有机聚合物材料和器件的研究中得到借鉴与应用, 并取得了重要进展 例如最近报道采用 ITO/TBD/TAZ/AIq/Mg:Ag 结构做出的 LED, 发出 464nm 蓝光, 其亮度达 3700cd/m² 据报道发光效率已高达 4%, 无疑这是一个重大的突破, 基本能满足显示屏亮度的要求, 并且可以做出电控调色的聚合物 LED 使显示功能更加多样化

由于 GaN 系蓝光 LED 和 LD 的成功发展, 人们把可调谐波长的聚合物膜与 GaN LED 或 LD 组合在一起, 以短波长 GaN LED 为光泵, 可以实现白光和各种颜色光的发射 这种光泵 LED 可以随意调色, 又不存在聚合物中的载流子运输和电极氧化导致失效的问题, 因此使用寿命可能很长 由于它的发光效率可以很高, 因而有可能发展成为大面积室内薄膜照明器 这也是一个诱人的应用前景 有机聚合物的发展为信息显示技术提供了又一新的机会

7 结语

综上所述, 随着信息化社会的到来, 社会对信息量的需求将有爆炸性的增长, Tb/s 信息流的传输、交换、处理与存储将成为信息化社会的关键基础, 光子技术或光电子技术尤其是半导体光子学及其集成技术将成为实现上述宏大目标的不可替代的手段, 而半导体光子学或半导体光电子学将是未来信息化社会的重要支柱

窄线宽高速率的集成激光器将是发展 WDM 和 OTDM Tb/s 容量传输的基础 偏振中性 SOA 光开关, SEED 光双稳器件及其集成面阵是高速率光交换系统所必需 低功耗面发射 VCSEL 激光器, SEED 光逻辑门面阵及其 MCM 多片组装技术是发展光互连技术提高计算机运算速率和发展超大容量体全息存储技术的关键 光纤尤其是光纤光栅技术将使信息获取技术更为实时化、多功能化, 而半导体发光二极管尤其是 GaN 蓝光激光器和高亮度 LED 的突破, 不仅使光盘存储技术推向高容量的 DVD 阶段, 而且将促使中远距离大屏幕全色显示的发展 有机聚合物的研究是光电子技术领域中异军突起的另一重要方面

人们容易习惯地把 Si 理解为只属于微电子技术领域, 实际上, Si 早已涉足光电子领域, 并已获有广泛的应用, Si 太阳能电池、Si 光电二极管、Si-CCD 以及 Si 光波导及波导光栅耦合器等已发展到了产业化规模, 但作为光电子学基础器件的单色相干光源和光逻辑开关器件则受到 Si 材料固有特性的局限, Si 的能带属间接带结构, 带间发光效率很低, 吸收边平缓, Si 又是共价键形态, 晶格对称性很好, 电光系数小, 非线性光学效应微弱, 难以做成 Si 基质的激光器甚至高效率 LED, 也难以实现双稳态光逻辑开关器件 近几年来应变单原子层异质外延技术的成功以及多孔 Si 高效发光的发现, 人们寄希望于利用能带工程途径, 藉量子尺寸效应以及稀土离子的高浓度掺杂, 并把 III-V 族光电子器件的成熟经验和引入到 Si 基材料中, 在 Si 基材料上实现高效率、高速率的光发射 也有可能利用纳米材料结构在 Si 中实现激子光电效应和非线性吸收效应研制出单稳和双稳态光开关 从而实现人们长期追求的 Si 基光电子学的目标 由于 Si 光子器件和微电子器件与回路集成完全兼容, 未来的集成芯片将是光电子微电子芯片, 因此 Si 光电子学的突破将会使信息技术领域产生新的重大的飞跃 尤其将推动 T 次/秒超快速计算技术的发展 难度虽大, 意义深远, 事在人为, 前景光明

参 考 文 献

- [1] 王启明, 固体电子学研究进展, 1995, 15(3): 205~ 214
[2] 王启明, 电子资讯, 1995, 1(2): 31~ 33
[3] 王启明, 自然科学进展, 1997, 7(2): 136~ 141.
[4] 王启明, 世界科技研究与发展, 1997, 19(2): 18~ 24

Semiconductor Optoelectronics in the Field of Information High Technology

W ang Q in g

*(Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, National Key Laboratories
on Integrated Optoelectronics, Beijing 100083)*

Received 7 May 1998

Abstract A review is given in the state-of-art of progress on advanced information high technology and being required in future, to be concerned with the technical fields of information transmission and processing, add/drop and switching, storing and reading as well as gathering and displaying. In particular, the key role of semiconductor optoelectronics in future development of information high technology and important main research subjects are discussed.

EEACC: 7240, 7220