

半导体量子光电子学的进展

王启明

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

就量子阱超晶格的基本物理、量子阱光电子器件对光通信发展的贡献和量子光电子器件对发展计算技术和信息处理技术的贡献等问题进行了较详细的讨论, 指出: 半导体量子光电子学的内涵既包含了新一代光电子器件的诞生, 同时也促进了以信息的传输、运算和处理为代表的新一代信息技术的发展. 半导体量子光电子学将与微电子技术并列成为未来信息社会的两大支柱.

Abstract

This paper presents an overview of the physical principles of quantum well (QW) superlattices, as well as the contribution of QW optoelectronic devices to the advancement of optical communication and to the development of computing and information-processing technologies. As a conclusion following detailed discussions the implications of the advent of semiconductor quantum optoelectronics are far beyond the emergence of a new generation of optoelectronic devices, it can promote the development of modern information technologies, represented by the transmission, calculation and processing of information. Like the microelectronic technologies, semiconductor quantum optoelectronics will become the mainstay technology in the coming future of information.

分子束外延(MBE)、有机化合物汽相淀积(MO-CVD)和化学束外延(CBE)技术的成功发展, 使人们实现了对各种半导体材料在原子层厚度控制范围之内, 有序交替的完美生长(即原子尺寸或量子尺寸的生长), 形成一种崭新的可予人工改性的微结构半导体材料, 其中最具代表性和普遍性的, 即所谓量子阱、超晶格结构材料. 在由这些结构材料所设计研制的半导体器件中, 不仅电子能量的转移(电子跃迁)遵从量子力学的规律, 电子在器件内部的运动也将呈现出强烈的电子波的量子化特性, 而且这些特性的强弱和殊异, 完全可以由组成量子阱超晶格的母体材料的组份和层厚尺寸来调整. 基于上述本质, 这种新颖的人工改性半导体材料呈现出一系列非常令人神往的电学、光学性质统称为量子尺寸效应. 人们正依据这些新特性的出现, 发展了新一代的半导体器件. 卓有成效的进展就在光电子学领域. 由于量子尺寸效应在光电子器件与集成中的成功采用, 使半导体物理

光电子学的器件与应用进入了量子光电子学的新时代, 并正在日新月异地推进着这个领域纵深方向的迅猛发展.

一、量子阱超晶格的基本物理

如图1所示, 量子阱结构就是采用上述的单原子层生长技术, 将带隙较小的材料夹在带隙较大的材料之中, 如 AlGaAs/GaAs/AlGaAs, 形成了一个势阱, 由于势阱厚度 100 \AA 左右, 大约为电子在半导体中的德布罗意波长, 因此阱中电子沿垂直阱平面方向的运动受到阱壁的阻挡, 以驻波的形式局域在阱中, 这种势阱称为量子阱. 量子阱中的电子、空穴沿垂直阱壁 z 方向的运动, 将遵循波动方程的规律, 能态呈现量子化的特性, 但在沿阱平面方向电子的运动仍然可以看作经典粒子, 其能态改变仍保持准连续性. 因此, 量子阱中的电子在带底的能态分布将分裂为一系列子带.

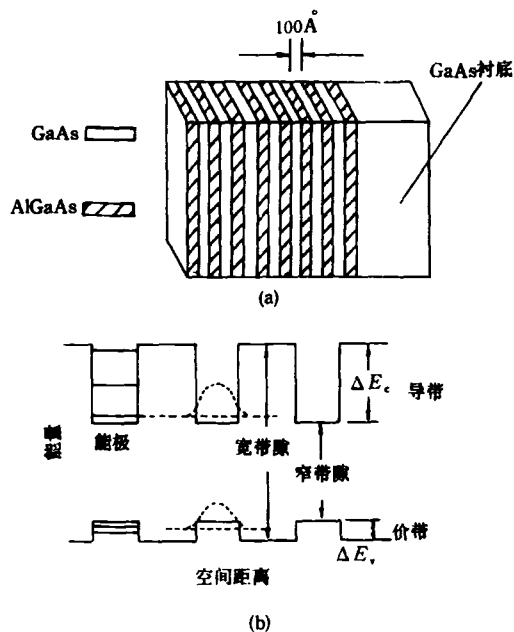


图1 AlGaAs/GaAs 量子阱结构和能带图

而由于沿 z 方向电子被局域化,因此,子带中电子能态的总密度减少了一个维度的贡献,将导致其态密度分布与体材料有很大的差异,如图2所示,它由抛物线态变为台阶状,而等效带隙向短波方向移动。

由于带底电子分布状况的明显改变,它将导致阱内部光增益谱有显著的殊异,量子阱的光增益谱显著变窄,因此在同一电子注入水平下,量子阱中的峰值光增益将大大高于体材料,这对获取低阈值电流、高量子效率、窄发射谱线和大的光功率输出是非常有利的。通常的半导体激光器中,由于谐振腔内部电子和光子有各自的弛豫时间常数,它们的相互耦合,导致一种自激光输出振荡现象,称为张弛振荡,其频率 f 一般为5GHz 以下,它限制了激光器的高速运行。

理论分析表明, $f \sim \sqrt{g'}$, $g' = \frac{dg}{dn}$ 即称微分增益。量子阱的微分增益明显地大于体材料,张弛振荡频率可上移至30GHz,很适宜于研制高速调制激光器。

量子阱的另一个重要特点,表现在它有很强的室温激子吸收行为,在量子阱中,激发态的电子在 z 方向的运动受到阱壁的限制,它只能

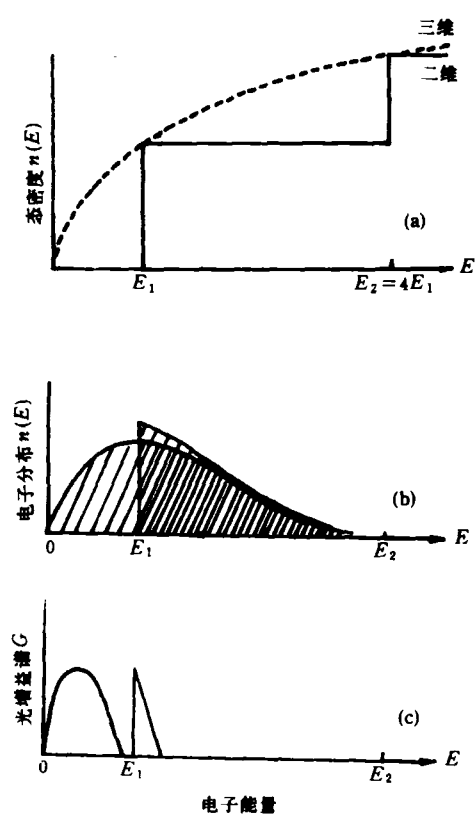


图2 量子阱中电子态密度函数与光增益谱
(达到相同峰值增益时所需注入载流子浓度:体材料, $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$; 量子阱, $1.4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)

在阱平面作圆周运动,因此,激子的库仑作用力将显著地比体材料大,其离化能比体材料高2—3倍。因此,在室温下,我们可以看到很强的激子行为。

由于在量子阱中激子的电子-空穴的基态波函数的交叠比体材料大,因此激子的光吸收几率很大,吸收峰很强,在不太强的光子密度下(例如 $10^{17}/\text{cm}^3$) 激子吸收就会被饱和,激子离化时间远小于体材料(仅为0.3ps),因此利用量子阱的激子行为作为可饱和吸收机制,尤其适用于发展 ps 响应的锁模或调 Q 激光器。

量子阱的另一个非常重要的特性即所谓量子限制 Stark 效应(QCSE),其特点是激子吸收峰随外电场灵敏地向长波方向移动(红移),它所能承受电场的强度比体材料中的激子行为几乎大50倍。量子阱材料之所以表现出这种很强的 Stark 移动,正是由于阱壁对电子空穴波的

限制效应,使得它们脱离不开量子阱的空间,因此产生了很强的极化。

还有一个特点,即驱使激子吸收峰明显移动所需电功耗比光吸收饱和所需者要低2个量级.由此可见,利用量子阱材料的激子 QCSE 效应制备很低功耗的高速电光调制器件是非常适宜的,它的响应速度可达亚 ps 量级。

通常构成量子阱的二种材料的晶格常数,都要经过精心选择调整,以保证它们之间的匹配,它限制了量子阱结构材料选择的自由度.一个重大的进展是在1986年 A. R. Adams 提出了应变层量子阱的概念。

应变层量子阱就是利用晶格不匹配的材料对,由于每种材料都非常薄,而使界面层保持在弹性限度之内,使它能够在承受由于晶格失配导致的内部应力,而保持一个经调整后的统一的晶格系统.由于阱材料同时承受了双轴应力和静压力,静压力将改变阱材料带隙,而双轴应力则导致带结构的改变.如果阱材料的晶格常数小于阱材料,阱材料将承受二个轴向的压应力,沿生长方向的阱材料晶格常数将变大,带隙将会增加,这种情况称之为压缩应变状态.相反,如阱材料的晶格常数比阱材料大,则阱材料在二个轴向承受的是拉张应力,而沿生长方向阱材料的晶格常数将变小,带隙随之减小,这种情况称之为拉张应变状态.以 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ 为例,如图3所示,在没有应力的情况下,阱材料 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的价带是对称与简并的.在压缩应变的情况下,由于双轴应力的作用,重空穴 HH 带与轻空穴 LH 带将发生分离,LH 带往下移动,轻重空穴的混合行为减弱, x, y 方向的压缩应力导致 x, y 方向 HH 带的形状变得陡峭,意味着重空穴有效质量减少,而 z 方向则仍保持原来的状态.对称性受到了破坏,正是由于二个维度上有效质量的减小,总的 HH 带态密度亦将显著变小,它导致一些重要物理特性的优化改变,例如,带间吸收的明显减弱,增益谱的显著提高和变窄,微分增益的变大,Auger 复合和价带间内吸收的减弱.无疑上述的一些物理特性的变化,对于研制优质的激光器非常重要。

物理

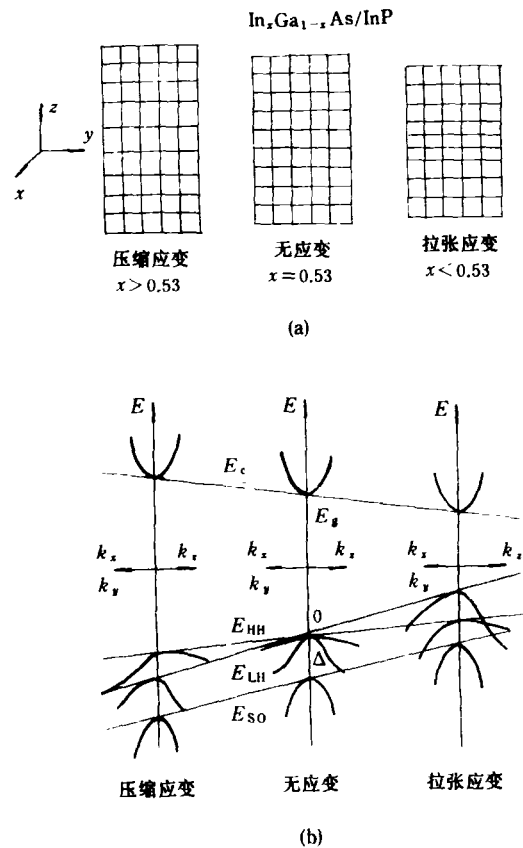


图3 应力状态下量子阱带结构的变化

二、量子阱光电子器件对光通信发展的贡献

自从60年代末、70年代初,低损耗石英光纤研制成功和室温连续波工作半导体双异质结激光器的问世,开辟了实用化光纤通信的新纪元,20年间光通信技术以其罕见的速度飞快发展,它已成功地推进了 $0.85\mu\text{m}$ 短波长多模传输光通信, $1.3\mu\text{m}$ 长波长单模传输光通信和 $1.55\mu\text{m}$ 长波长单模传输光通信的工程实用化发展.当前人们所关注的是超大容量光通信、超高速光通信和超长距离光通信.未来提高传输容量的发展方向是采用高密度和超高密度波分复用技术(HDWDM, UHDWDM),目标是30信道和500信道同时传递,每个信道间隔 $<1\text{nm}$,这就要求研制出有一系列不同波长的单频激光器,并能简单、方便、有效地把各个信道的信息光高

效率地汇集耦合到光纤中去. 采用不同光栅周期反馈的 DFB 激光器, 虽然可以制备一系列不同波长的激光源, 但制备工艺太难, 经济代价太高, 因此, 人们必须寻求一种电控可调谐单稳频激光源. 1988年, Bell 实验室报道了如图4所示的多段结构多量子阱分布布拉格反射式 DBR 激光器, 它利用载流子注入到反射光栅区改变 Bragg 光栅的折射率, 因而实现调整 Bragg 光栅的衍射波长. 问题的关键是要求有源增益区要有足够宽的光增益谱宽, 多量子阱结构, 有比体材料更宽的动态增益谱, 可以实现激光波长的宽调谐. 目前报道的调谐范围已达10nm, 因而一个简单多段 DBR 激光器, 加上电控, 即可提供10个信道的激光源. 人们只要设计研制10种不同光栅周期的多段 DBR 激光器, 并加上电控操作, 就能经济地实现100信道 UDWDM 通信技术的需求.

光纤放大器的成功发展, 是光纤通信技术发展的革命性突破, 由于光纤放大器有30nm

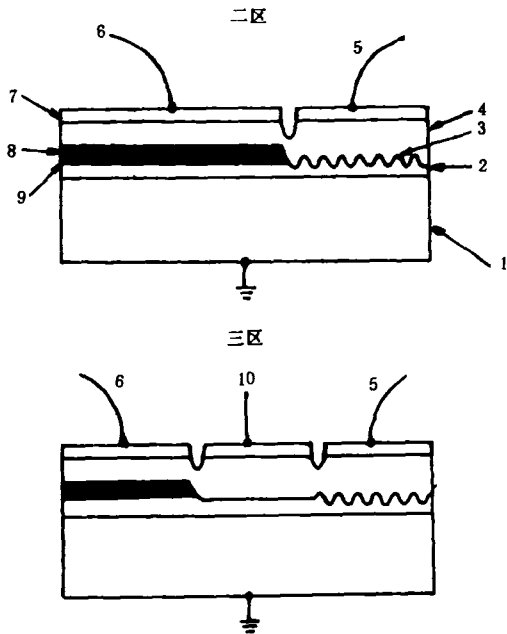


图4 二段及三段结构量子阱分布反射式(DBR)电控可调谐激光器

1. N⁺ InP; 2. 1.3μm λg InGaAsP; 3. 一级波纹;
4. P⁺ InP; 5. I_{tune}; 6. I_{laser}; 7. P⁺ InGaAs;
8. InGaAs/InGaAsP; 9. InP 刻蚀阻挡层;
10. I_{phase}

的带宽, 它可以同时放大30个信道的传输光, 无需电子伺服系统, 而且有很高的信噪比, 诚然它是一个理想的中继放大器件. 小型化量子阱大功率泵浦源激光器的研制成功, 对光纤放大器的实用化作出了重大贡献. 掺入 SiO₂ 光纤中的 Er³⁺ 有几个激发带, 最强激发带中心波长是 0.98μm, 其次为 1.48μm, 泵浦光源可以通过传输光纤耦合进入放大光纤中. 虽然 0.98μm 的泵浦源有更高的泵浦效率, 但是由于石英光纤对 0.98μm 波长的损耗比较大, 因此它只能近距离使用, 1.48μm 波长处于光纤低损耗窗口. 因此, 它适用于远距离泵浦, 尤其对中继放大使用更为合适. 因此, 近几年这二种波长的泵浦源激光器的研究已成为人们主攻的热点. InGaAs/AlGaAs 压缩应变层量子阱激光器, 不仅可以通过改变组分和阱宽, 将波长调准到 0.98μm, 而且由于双轴压缩应变效应使吸收损耗减小, 阈值电流降低, 微分效率提高, 因而能够获得大功率的激光输出. 1991年国际集成光学和光通信会议报道, 这种应变层单量子阱激光器, 室温连续输出达 385mW, 而阈值电流仅 17mA, 50mW 单模运行, 寿命超过 10 万小时, 它是放大器的理想泵浦源. 至于 1.48μm 大功率泵浦源激光器, 人们采用了 InGaAsP (1.2μm)/InGaAsP 压缩应变多量子阱结构, 在 1% 晶格失配条件下, 已获得阈值电流低至 20mA, 1000μm 腔长下最大输出功率高达 312mW, 无疑这是一项重大进展.

在超长距离光通信系统中, 人们选择 1.55μm 附近石英光纤最低损耗 0.154dB/km 窗口进行传输. 由于 1.55μm 波段不是光纤的零色散区, 色散效应使得长波长谱份的光比短波长谱份光有更大的群速度. 在长距离传输后, 将导致光脉冲码形的展宽, 系统误码率的增大. 这种反常色散效应限制了无中继传输的距离, 随着传输码率的提高, 中继距离就将缩短, 一般满足关系

$$B^2 L \leq 4000 (Gb/s)^2 km,$$

其中 B 为传输码率, L 为中继距离. 例如, 对 5Gb/s 的传输码率, 无中继距离大约为 100km

左右,自然人们又研究了一种色散移动光纤,可以将零色散区移到 $1.55\mu\text{m}$ 范围,不过还很成熟,从经济观点来看,代价太大.

1973年,Bell Lab A. Hasegawa 等人基于光纤非线性效应的考虑从理论上提出了一种光学孤子的新概念,即在呈现非线性效应的光纤中,存在着各种阶别的光脉冲传输,它能够自动整形,就像孤立的粒子一样,自始至终保持着互不干扰的光脉冲形状.从物理上来说,就是由于光纤中的非线性效应使得不同强度的光脉冲存在不同的相速度,因而在传输过程中产生不同的相移,光脉冲前半部分的光分量谱线往长波方向移动,后半部分较弱的光分量谱线往短波方向移动,这种非线性效应的移动方向正好与反常色散方向相反,如经参量调整后,使二种效应达到互为补偿由此实现对光孤子的高速传输.

理论计算表明,只要注入光的幅度和形状接近激发光孤子的初始条件,就能够在光纤中激发这种光孤子.高速率 ps 半导体量子阱激光器的成功,为光孤子通信奠定了重要基础.由于光纤非线性效应只有在一定光振幅强度下才能呈现,只有保持光脉冲幅度不变,光孤子的特性才能维持.但是由于光孤子在传输过程中的吸收与散射的损耗,它的能量将不断衰减,因此,在经过一定距离后,必须通过光放大的途径给光孤子补充能量.曾经有过利用拉曼散射和布里渊散射效应来实现对孤子的光放大,但是效率太低,不太实用.只有采用半导体激光泵浦的掺铒光纤放大器才给光孤子通信技术的开拓带来了活力.

1992年光纤通信会议(美国国家会议)上,NTT 报道了在 10Gb/s 码率下,成功地进行了一百万公里的光孤子传输实验,其中约每八万公里接入一个中继光纤放大器,预计3—5年后有可能达到实用.

三、量子光电子器件对发展计算技术和信息处理技术的贡献

当代电子计算技术的飞速发展,正在改变物理

着社会的生活和生产状态,大大提高了人们社会活动的效率.由于社会物质、精神文明的大大丰富,竞争程度的剧烈加强,信息量的无限膨胀,大大地推动着电子计算机的运算处理速度往更高的水准发展.作为二进制算法的电子计算机逻辑门的开关速度,虽然已可达 ps 量级,但是由于电信息的传输受到回路分布参数时延的影响,因而远未能达到其运行的极限,这就是所谓的瓶颈阻塞效应.人们从二个方向着手解决问题,一个是一台主机并行连接多个子机进行并行处理的办法,另一个则考虑利用光代替电传输信息,以解决电传输的时延问题.

提高计算机运算速度的关键,还在于解决主机中的数据传输时延问题.当前人们正在着手解决主机中插板之间的光互连,并在积极研究芯片之间的光互连.据说,如在电子计算机中一旦采用这种光互连后,其运算速率可以提高三个量级.这是一个很吸引人的课题.可以认为光互连技术正从长程光互连(km)向短程(cm)光互连发展.

计算机芯片光互连的实现,对光源有很高的要求.首先是它的功耗必须降低到与一个芯片中逻辑门的总和相当的水平,例如亚毫瓦的量级,才能保证机体不致承受过大的功耗.其次是光源的传输响应带宽要很大,这时光纤色散的影响可以不计,主要决定于激光器的响应速率.再则,激光器要有很低的噪声,对于邮电通信系统只要求误码率优于 10^{-9} 量级,而对电子计算机互连的误码率要求则应优于 10^{-15} ,提高了六个量级.此外,连接要方便.端面出光的激光器只能依靠光纤来互连,如果采用面发射激光器,就可以实现自由空间光互连,这样的计算机系统将在空间尺寸和重量方面和通常电子计算机一样.

为实现上述要求,人们同样寄希望于量子阱激光器.只有应变层单量子阱激光器才能够实现亚毫安级超低阈值室温工作.理论计算结果腔长 $L=200\mu\text{m}$ 的激光器,阈值电流密度 J_{th} 低达 $80\text{A}/\text{cm}^2$;镀上反射膜($R_1=R_2=0.9$),则 J_{th} 低达 $15\text{A}/\text{cm}^2$;如采用条宽 $W=2\mu\text{m}$,则相应

的阈值电流分别为4mA, 0.6mA. 1991年, 美国 A. Yariv 实验室报道, 实验上已能获得最低阈值为0.75mA, 相应电流密度100A/cm², 如把条宽再缩小一倍, 则可达0.37mA, 已接近理论值极限. 可见, 采用应变层单量子阱结构完全可以实现超低阈值电流的激光器, 量子阱激光器直接调制完全可以高达10GHz 以上.

垂直腔面发射激光器是1977年日本东京大学 Iga 提出, 初期进展缓慢, 直到1988年, 才报道获得室温连续工作, 此后, 由于量子阱结构的引入而得到了飞速发展. 1990年, 美国 R. S. Geels 首次报道阈值电流降低到亚毫安量级 0.7mA, 这无疑是量子光电子学的一项重大突破.

垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 与普通边发射激光器有很大不同, 如图5所示. 后者的有源增益区长度即为 F-P 谐振腔长度 (100 μ m 量级); 而对 VCSEL 器件, 由于谐振腔垂直于生长平面, 有源层的厚度决定了增益区的长度. 因此, 这种器件的单程增益要远小得多, 解决的途径应该是尽量提高有源材料的增益系数. 这就是采用量子阱结构, 增大腔内反馈光的权重, 即增加腔面的反射系数, 以便获得大的多程激光增益. 再则, 尽量减小腔体的长度, 降低腔内损耗. 由于半导体异质结构 Bragg 反射器的引入, 人们就能够把 VCSEL 器件的谐振腔长度做到 10 μ m 的量级, 这种很短的 F-P 腔结构将使纵模的间距拉开很大, 可以使得只有一个纵模落在有源层的增益谱内, 因而, VCSEL 器件将能获得单一纵模的发射.

应变层量子阱结构同样可以采用于 VCSEL 器件有源层, 因而使器件特性得到进一步优化. 不同作者所发表的最新结果, 阈值电流密度低达 600A/cm², 阈值电流 0.7mA, 腔面积约 100 μ m², 单模输出最小线宽 85MHz, 弛豫振荡频率为 39GHz, 如将腔面积缩小为 25 μ m², 则阈值电流将降为 0.2mA. 垂直腔面高速响应激光器特别适宜于实现电子计算机中的芯片光互连, 它很容易对准, 无需借助光纤的耦合, 一些光学的傅里叶变换技术和全息技术都可以在光

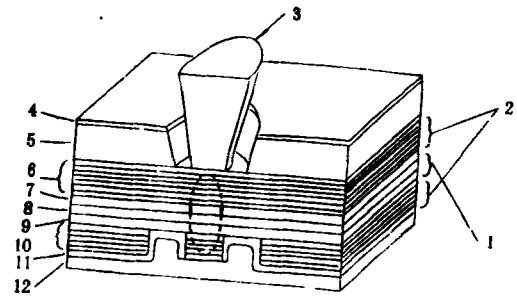


图5 垂直腔面发射(VCSEL)AlGaAs/GaAs 激光器结构示意图

1. 量子阱结构有源增益区; 2. 超晶格 Bragg 反射栅; 3. 发射光束; 4. 金属电极; 5. 衬底; 6. n-Al_{0.1}Ga_{0.9}As/AlAs; 7. n-Al_{0.3}Ga_{0.7}As; 8. p-GaAs; 9. p-Al_{0.3}Ga_{0.7}As; 10. p Al_{0.1}Ga_{0.9}As/Al_{0.7}Ga_{0.3}As; 11. SiO₂;
12. 金属电极

互连中采用, 而满足实现并行处理的传输要求.

垂直腔面发射 (VCSEL) 激光的成就远不止于对电子计算机光互连的贡献. 由于这种 VCSEL 激光器很容易实现高密度的平面列阵集成, 它对于光信息处理和光计算技术的发展有着特殊的贡献. 如果一个 VCSEL 的功耗按 0.5mW 考虑, 电光转换效率为 50%, 则 100 \times 100 的阵列所承受的总功耗仅为 2.5W, 这相当于一个小灯泡的功耗, 这样水平的功耗在实用化的光电子系统中完全能够承受. 人们成功地发展微腔激光器, 它的腔面直径仅 0.5 μ m, 腔长仅 8 μ m, 如阈值电流密度保持不变, 则单个激光器阈值电流将降到 1.5 μ A, 对 1000 \times 1000 面阵, 其功耗也只有 1.5W, 这是一项非常引人注目的成就. 这种微腔 VCSEL 激光器面列阵, 首先用于图形识别的光信息处理.

神经网络计算技术的发展, 是目前人工智能领域的重要组成部分. 神经网络计算技术的一个重要特点, 即它具有广泛的联想功能. 因此, 在硬件上要求每个神经元与其他神经元之间有广泛的众多的互连. 集成电路芯片要实现这点, 工艺复杂, 难度很大, 而采用 VCSEL 的 OEIC 面阵芯片就容易得多. 例如, 一个 100 \times 100 微腔 VCSEL 面阵, 每个 VCSEL 相伴一个 PD 探测器, 并伴有相应接收电路, 一对 VCSEL, PD 就构成一个光电子神经元, 利用全息

技术,将设计好的全息反射片与神经元平行地适当放置就可以方便地在10000神经元之间实现自由空间光互连,同时它们之间有很强的互不干扰特性。

人们正在竭力探求利用光波直接进行数据的运算,这就是全光计算技术的发展.人们思维的起点自然还是立足于二进制逻辑运算,因此,就必须研究光学逻辑门,即探索实现光学逻辑门的量子阱结构材料出现之后,才在室温下观察到这种显著的效应。

1984年,AT & T Bell Lab Miller 最先提出了一种利用量子阱量子限制 Stark 效应的自电光效应光双稳 (SEED) 器件,如图6所示,它实际上是一个 i 区由量子阱构成的 PiN 光电二极管.器件上下端面都可以进出光,反向偏置通过负载,施加在器件上.如果我们选定的入射光波长是对应于零场下激子吸收峰,那么,由于 QCSE 的红移效应,在偏置操作状态下,它是透光的亮场.然而随着光强的增大,部分激光的光电流将不可忽视,它在外回路负载上将产生一定电压降落,因而在量子阱 i 区的压降将减小,红移效应减弱,激子吸收随着光强的再增加,入射光将会由亮场突然变暗.由于此刻量子阱材料对入射光波长有更大的吸收系数,因此,即使回调减弱入射光强度,仍然维持有足够的 photocurrent 降落在外回路的负载上,以保持 i 区的零场接近状态,于是在光的输入输出图象上,就出了双稳态的回滞线,这就是 SEED 器件的基本物理过程。

量子阱激子峰的谱宽要比 F-P 腔的谐振模宽大,因此这种光双稳器件比较容易实际应用.如果采用超晶格结构,由于各个阱中激子波函数的交叠,激子的谱宽还可以增大,更有利于实际应用。

构成光逻辑门的是采用对称式 S-SEED 器件,即在同一基片上将二个 SEED 器件串接,物理

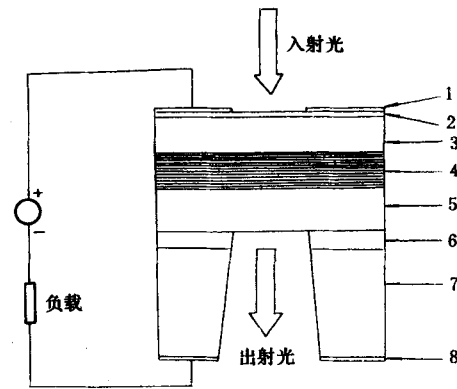


图6 超晶格自电光效应(SEED)光双稳态开关结构示意图

1. Cr-Au 合金; 2. p-GaAs, $\sim 200 \text{ \AA}$; 3. p-AlGaAs, $\sim 1 \mu\text{m}$; 4. i-MQW 层, GaAs/AlGaAs;
5. N-AlGaAs 刻蚀阻挡层; 6. N-GaAs 缓冲层, $\sim 0.5 \mu\text{m}$; 7. N-GaAs 衬底; 8. AuGeNi 合金

器件都可以由外部光照射,其中一个器件当做另一个的负载,而且在底部 n 区的下面同时制作周期结构的半导体 Bragg 反射器,使得输入、输出光都在同一器件表面操作。

目前,对 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 面积的 SEED 器件开关速度已小于 1 ns ,开关能量仅为 1 pJ ,而工作电压为 15 V ,反射型 S-SEED 器件尤其容易实现高密度集成大面积面阵,迄今报道的最大面阵为 $128 \times 256 (32 \text{ K})$ 单元.这种 S-SEED 面阵,作为光逻辑阵列,已经在信息光交换系统、光互连和空间光调制器中开展了广泛的应用研究,它将对光计算技术的发展给予有力的支持和推动。

综上所述,人们即可清楚地认识到,半导体量子阱、超晶格的出现,不只是引发诞生了新一代光电子器件,而将给社会信息技术带来巨大的发展.半导体量子光电子学的内涵既包含了崭新一代光电子器件的诞生,同时也促进了以信息的传输、运算和处理为代表的新一代信息技术的发展.半导体量子光电子学将与微电子技术并举成为未来信息社会的二大支柱。

- [1] E. H. Li & B. L. Weiss, *Electronics & Communication Engineering Journal* April, (1991), 63-78.
- [2] D. A. Miller, *High Speed Electronics* 11(1990), 19.
- [3] 王启明, *中国科学院院刊*, 第2期, (1989), 107.