

国外集成光学的现状和发展趋势

上海科学技术情报研究所 编

上海科学技术文献出版社

国外集成光的现状和发展趋势
上海科学技术情报研究所编

*

上海科学技术文献出版社出版
(上海高安路6弄1号)
新华书店上海发行所发行
上海科学技术情报研究所印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 1. 字数: 25,000
1979年1月第1版 1979年1月第1次印刷
印数: 1—9,400
书号: 15192·8 定价: 0.15元

(限国内发行)

国外集成光学的现状和发展趋势

一、引言

集成光学是在集成电子学和激光技术的基础上发展起来的一门新的边缘学科，它是光电子学的一个重要分支。集成光学主要是研究集成光路的理论和制造技术，它是发展光通信和光计算机的基础科学。集成光学出现虽然还不到十年时间，但发展极其迅速。由于它在光通信和光信息处理方面存在着巨大的潜力和经济效益，已引起了世界各国的重视。据不完全统计，目前国外已有50~60个电子通信大公司、高等院校和军事部门在从事集成光学的研究和探讨工作。其中，美国主要有贝尔电话实验室、国际商业机器公司沃森(Watson)研究中心、德克萨斯仪器公司、休斯飞机公司、塞罗克斯(Xero)公司的研究实验室，以及麻省理工学院林肯实验室、南加利福尼亚大学激光研究中心、卡内基-梅隆(Carnegie-Mellon)大学和华盛顿大学的电气工程系、纽约工学院电气工程和电物理系、美国海军研究实验室、海军电子实验中心等十几个单位；加拿大贝尔北方研究所；日本主要有日立中央研究所、日本电话电报公司，以及东京工业大学电子工程系、东京大学电信学院、东京电信大学、大阪大学、名古屋大学工程科学学院等；在西德主要有西门子公司和通用电气·德律风根公司的研究实验室、鲁尔大学高频和超高频技术学院、道脱蒙特(Dortmund)大学物理学院；另外，还有英国标准电信实验室、索斯安普顿大学、格拉斯哥大学电气工程系、荷兰飞利浦研究实验室等。

此外，从1971年召开第一届薄膜光波导国际会议以来，国外定期召开的有关集成光学的国际性讨论会，其中主要有美国电光仪器工程师协会自1972年起每两年召开一次的光纤维与集成光学专题讨论会；美国光学学会和国际电气和电子工程师协会定期联合召开的光纤维传输专题讨论会；美国康乃尔大学每两年召开一次的电气工程会议中有关集成光学器件专题讨论会；以及国际电气和电子工程师协会召开的历届光电系统设计会议、电子器件会议和国际通信会议；国际电信联盟主办的世界电信讨论会；欧洲光导纤维通信会议都进行有关集成光学专题讨论会。同时，历年来国外在这方面出版的专门著作、会议录，以及发表的技术性和评论性文章，其品种和数量是多得不胜枚举的。

二、集成光学发展的原因

集成光学是在六十年代末期出现的，它的产生首先是光通信系统应用发展的需要，也是光学器件本身研究发展的必然结果，正如恩格斯早就指出的：“社会一旦有技术上的需要，则这种需要就会比十所大学更能把科学推向前进”。

其次，集成光学的产生也受到了半导体集成电路发展的重大影响。它的基本设想就是把光学系统做得象集成电路一样，把激光器、调制器、探测器等有源器件集成在同一衬底上，并通过波导、耦合器等无源器件连结起来，构成一个完整的微型光学系统。普通的光学器件

体积大、重量重、易受环境干扰、对准困难，早就不能适应光电子技术发展的需要，故光学系统必须向薄膜化、微型化和集成化方向发展，集成光学就是为适应这个要求而产生的。

此外，我们从集成光学与集成电子学在通信技术和计算机技术两个方面的应用对比中也可看出集成光学潜在的应用具有无可比拟的优越性。

通信技术一直是电子技术发展的主流，一百多年来，经历了从有线到无线，从长波到微波、毫米波的发展阶段。由于受到频谱的限制，目前微波通信系统只能同时传输10,800话路，预计毫米波通信系统可以同时传输50万话路（理论上可传输100万话路），通信容量比微波通信系统要大46倍。而利用集成光路通过光导纤维实现用光波代替电波传输信息的光通信，比毫米波通信容量还要大一万倍。因为可见光波比厘米波段的微波频率高1万~10万倍（ $10^{-4} \sim 10^{-5}$ ），在理论上光波带宽可达一百万千兆赫（ 10^{15} 赫），所以一根直径100微米的光导纤维可以同时播送1000万路电视节目或同时传输100亿路电话。这样巨大通信容量的光导纤维通信系统一旦实现长距离的大容量传输和小型集成化的目的，当然是非常吸引人的。

另外，作为电子技术发展重要标志之一的电子计算机，虽然经历了四代发展，进入到大规模集成电路计算机的时代，并正在向超大规模集成电路计算机时代过渡，但是它始终没有脱离电子学范畴。基于集成光学原理的光计算机的出现，将是电子计算机的一次革命性变革，在理论上它的运算速度可高达每秒一百亿次到一千亿次，存贮容量为兆兆兆位（ 10^{18} ），比目前运算速度最快的（1.5亿次/秒）伊利阿克Ⅳ型电子计算机（系由64台计算机联机使用）还要快100倍到1000倍，存贮容量大一百多万倍。将来利用集成光路实现光信号的逻辑运算、传送和信息处理，同时能存贮极大量数据，而它的体积又极小、运算速度又极快的全光计算机无疑地也是非常吸引人的。

三、集成光学发展的历史沿革

集成光学的原理是用薄膜以光频传输电磁波能量。它的起始主要受到微波工程学和薄膜光学两个技术领域的启发和影响。集成光学的基本设想是把光波限制在一层很薄的（微米量级）薄膜内，在这种薄膜内激发、传输、控制和探测光波。因此光导波现象构成了集成光学的基础，故集成光学又称为“薄膜光电子学”或“导波光学”。

集成光学正是在对导波现象进行研究的基础上发展起来的。对光波导的研究可以追溯到1910年Hondros和Debye对介质棒进行的研究。而对导波现象的研究是从1962年到1968年这个时期开始的。早在1962年Yariv等人就注意到GaAs p-n结激光器中存在着导波现象。于是他们提出了“波导”假设，设想在GaAs二极管中自然地形成某种光波导，夹心在低折射率层中的高折射率层，光波只在这一层中传播，从而降低了衍射损耗。接着，在1963年他们对介质波导模式进行了初步的计算。他们的结论于1964年被Nelson和Reinardt所证实，在GaP二极管上施加反偏压，观察到了波导现象和电光调制现象，这是将两种不同的光功能结合在同一衬底上第一个雏型。基于上述研究，Osterberg和Smith用薄膜进行了图象传输试验，发现即使不用激光，通过薄膜也能导光和耦合光束到薄膜中去，从而构成了第一个可初步实用的无源光波导，其中有些元件一直沿用到现在。它与目前平面玻璃波导和棱镜耦合器所用的元件很相似。虽然在1962年前后对平面介质波导已有很好地了解，并已被微波工程学所应用。

一直到1965年, Anderson及其小组把微波学原理与光刻技术相结合,才构成了红外波段的薄膜波导,以及其他平面元件和线路。这种探讨被称为“准微波光学”。

导波现象的发现和研究的,反过来推动了激光器的发展。根据波导可以限制光波从而降低阈值的原理, Kroemer等人在1963年就提出了异质结激光器的原理。开始在GaAs—GaAsP体系中作试验,但因晶格失配严重没有获得成功,继而在1967年转向GaAs—GaAlAs体系,终于在1969年取得显著效果,在1970年实现了室温连续工作的双异质结注入式激光器,为发展集成化光源打下了基础。再加上Snitzer和Osterberg等人对圆形介质光波导(或光纤)获得的成果,就提出了在数据处理中使用平面光波导在一定距离传输光表面波的设想,于是“集成光学数据处理机”和“光集成电路”一类用词就在1968年前后被采纳。Miller在1969年概括这些用词为“集成光学”,同时宣告了用于光通信的可靠声表面波薄膜技术的研究和发展的起始。

在六十年代末至七十年代初,在研究波导和激光器基础上又进一步论证了各种引导机理和导波现象,其中值得注意的是Tien等人于1969年所作有关棱镜耦合器的研究工作,以及Dakss等人于1970年所作有关光栅耦合器的工作,他们成功地解决了如何把高斯激光束耦合入和耦合出电介质波导的问题。其中以Kogelnik和Shank于1971年制作的带波导结构的激光器尤其引人注目。Somekh等人于1973年在用质子轰击方法制作的槽形波导之间进行功率传递的实验证明了光学定向耦合器的可能性。

集成光学从纯基础研究转向应用研究最突出的例子是对调制器的应用研究。如薄膜光波导调制器,由于它具有频带宽、耗电量小、能与其它薄膜器件相匹配的性能,已在光通信和光信息处理系统中获得了广泛的应用。这些器件是应用电场、磁场或声波改变材料的介电张量,以此改变引导光波的振幅、相位或频率。在这方面以电光调制器的研究最为活跃,如Reinhart等人于1972年报道了高效率的GaAs—GaAlAs双异质结偏振调制器,它能获得 π 弧度的相位调制,并可望达到4GHz的调制带宽。Campbell报道了一种二维GaAs电光波导调制器,它的调制能力超过95%。声光调制器的早期工作大多不是在半导体材料上进行的。1974年Cheo等人对GaAs波导膜进行了共线调制和布拉格衍射调制的试验,获得的效率比体器件的理论值高出二个数量级。Tien等人利用法拉弟效应在外延铁石榴石/镓石榴石波导上进行了调制/开关试验,获得了52%的转换效率(80兆赫,100毫瓦)。

由气体和固体激光器产生的光束虽也可用作集成光学的光源,但要实现集成光路则必须使光源微小型化。Kressel和Nelson, Alferov等人研制的平面结构GaAlAs异质结激光器虽然比较适用,并且已实现室温连续工作,但由于它的谐振腔系由一对反射镜构成,故这种激光器是难于实现集成化的。为此Kogelnik和Shank研究了分布反馈(DFB)染料激光器,在1974年实现了GaAs分布反馈激光器,随后为了改进这种激光器的寿命,又研制了分布布拉格反射式(DBR)激光器,它是将周期结构光栅制作在有源区两端有源波导区表面,目前已实现了室温脉冲工作。为了探索适用于集成化激光器结构,美国德克萨斯仪器公司在同一单片上做出几百个“ Γ ”型台面激光器,它与分布反馈激光器相比,省掉了制作精细光栅的工艺。日本东北工业大学制成了集成化双波导激光器,日立中央研究所制成了在同一GaAs衬底上集成六个不同振荡波长的分布反馈激光器等等。

最后再提一下集成光路中的探测器。一般硅探测器,如PIN硅光电二极管、硅光电雪崩二极管只能用于混集成光路中。为了解决单片集成化问题,Ostrowsky在1973年采用尖劈耦合将玻璃/Si-SiO₂光波导与硅雪崩二极管集成在同一衬底上制成了集成化硅探测器。1975

年Swang等人报导了硅肖特基探测器与二维波导(Si/SiO₂-Si)之间耦合。在单片集成光路的探测器方面,以Stillman等人报导的InGaAs肖特基势垒探测器最为典型。与这种器件结构相似的还有GaAlAs肖特基势垒探测器,这种探测器的特征是在GaAs(GaAlAs)材料中掺入第三种元素使禁带变宽形成探测器。Yariv等人道报了将高能质子注入GaAs材料形成吸收区以构成质子注入探测器。最近还报导了双异质结GaAs-GaAlAs探测器,这种器件的特点是材料的组成与激光器相近,便于集成化。

总之,自从1971年3月召开第一届“薄膜光波导”国际会议为集成光学的发展奠定基础以后,从历届国际集成光学会议讨论的中心题目可以看出其巨大的进展。1972年集中讨论了薄膜波导,1974年讨论中心是薄膜调制器,1976年突出地讨论了薄膜激光器,1978年将讨论单片集成光路。由此可见波导、调制器、激光器等分立器件在技术上已趋于成熟。目前国外在单片集成化方面已进行了一些初步尝试,并且在技术上已有所突破。如贝尔电话实验室Reinhardt和Logan已将异质结激光器与透明的无源波导集成在同一芯片上。东京工业大学Suematsu等人用消失场耦合将无源波导与台面激光器集成在同一芯片上。Reinhardt和Logan后来又搞出了激光器/调制器。此外,国外正在大力研制在同一芯片上的集成化器件,如激光器/波导,调制器/波导,探测器/波导以及波导/波导。最近贝尔实验室报导了在同一GaAs衬底上集成了双异质结激光器、探测器和光波导器件。

从上面介绍集成光学技术的产生和发展的历史沿革中可以看出,集成光学正在稳步地发展中,虽然距离实现单片集成光路为时尚远,就是实现混合集成光路也还需要很长的时间。国外初步估计混合集成光路在八十年代可能会突破,单片集成光路要到九十年代才会突破,以便满足发展光通信和光计算机的迫切需要。

四、集成光学器件

从集成光学发展来看,近年来对以GaAsⅢ-V族化合物以及砷酸锂等电光晶体材料为基片组成的集成光学器件研究将最为广泛。但是从要求全功能(既产生光信号,又能处理光信号)来看,GaAsⅢ-V族化合物较为理想,它能制成光波导,调制器,探测器,激光器等。现分别地简介如下。

(一)薄膜光波导

薄膜光波导是构成集成光路的基本元件。它在集成光路中的作用是尽量不损耗地沿着指定方向传输指定模式的导波,并通过耦合器把不同的元件连接起来。它是由介质薄膜、上盖层和衬底三层介质所组成。为了把光波限制在介质薄膜中传输,根据光全反射原理,介质薄膜的折射率必须比上盖层和衬底的折射率高。这样,光波以一定角度进入介质薄膜后,在薄膜与上盖层和薄膜与衬底两个界面上发生全反射,沿锯齿形路径进行传输,形成光波导。

制作光波导首先要考虑光波传输中的损耗。损耗为0.1~1分贝/厘米的光波导是比较理想的,通常单片集成光路中波导损耗应小于10分贝/厘米,所以对光波导材料有较高的要求。

构成GaAs材料波导的基本条件是形成厚度与光波波长相近、折射率比衬底高的薄层。

改变GaAs材料折射率有两种方法。一种是用掺入第三种元素如铝或磷来改变材料的组分,从而引起折射率的变化。另一种是改变材料的电学性质——控制自由载流子浓度来实现。

下面首先简介一下改变材料的电学性质——控制材料的自由载流子浓度构成波导的方法。

目前国外利用GaAs的电学性质控制折射率制成了三种波导。

1. 纯度外延波导

众所周知,引起波导损耗的因素可分为两类。一是材料的光吸收,包括本征吸收和自由载流子吸收;二是由于材料缺陷或折射率的不均匀性引起的散射损耗。如果材料是多晶结构,其晶粒的大小可与波长相比拟,晶粒间晶界所引起的损耗就会十分严重。因此目前优良的波导材料均是由单晶材料和无定形材料组成的。个别多晶材料散射损耗不严重,这是由于晶粒远远小于波长的缘故,实际上这种多晶材料可以看成是无定形的。

散射损耗可分为表面和体内两种,表面散射损耗更为主要, Marcuse曾计算过欲使表面损耗忽略不计,表面的平整度应保持在数百埃左右。

至于吸收损耗,因为GaAs材料的禁带宽度约1.4电子伏特,所以它对波长1微米近红外区是透明的,它的本征吸收很小,为0.05分贝/厘米,而对GaAs材料的自由载流子吸收是主要的。所以用高纯度外延GaAs薄膜单晶可以制成低损耗的光波导。如美国麻省理工学院林肯实验室C.M. Wolfe等人用气相外延技术制成的平面GaAs光波导。这种波导的结构是衬底和外延层之间自由载流子浓度的不同,从而使两者之间的折射率差有 10^{-3} 的变化。外延层是生长在n型GaAs衬底上(晶向 $\langle 100 \rangle$, 浓度 1×10^{18} 厘米 $^{-3}$)外延层厚度在5至20微米之间。实验中比较了三种不同纯度外延材料制成的平面波导的损耗(从波长0.9~1.06微米),结果发现,用电离杂质浓度($N_A + N_D$)低于 2×10^{15} 的GaAs外延层制成的平面波导损耗是低的(≤ 4.3 分贝, $\lambda = 0.915$ 微米),但当材料的 $N_A + N_D \geq 5 \times 10^{16}$ (掺Sn)时,它的损耗就比较大,已不适用于作集成光路材料。这种高纯外延材料还可用于制作调制器/开关、探测器等电吸收器件。

2. 扩散型波导

如果把受主杂质扩散到N型GaAs材料中去,能在材料表面形成P型层,由于自由载流子的补偿而形成了埋入耗尽区,它的折射率比周围的N区和P区要高,它能把光限制在耗尽区附近,构成光波导层。

通常耗尽层的宽度非常薄(0.1微米数量级),但由于P型层的折射率比n型层要高,它也能起到光的限制和导波作用。因为GaAs的空穴有效质量比电子有效质量大十倍,所以同样数目的空穴,它的折射率的降低仅为电子的十分之一。

人们在研究GaAs激光器的过程中早已认识到GaAs扩散型p-n结光波导的作用,但当时对于GaAs p-n结波导中折射率分布和光强度分布从理论上和实验上都没有进行过深入的研究。

这种用GaAs材料制备p-n结的技术已成功地用于制作GaAs激光器,同样的方法无疑地也可用于加工光波导。

3. 质子注入波导

Garmire曾提出用质子注入形成GaAs平面光波导,在重掺n型GaAs衬底(晶向 $\langle 100 \rangle$ 或 $\langle 111 \rangle$ 上)以质子轰击形成深能级的载流子陷阱产生低载流子浓度的补偿层。据国外报导,一般补偿层的电阻率是 $\sim 10^7$ 欧姆·厘米,载流子浓度 $\sim 10^8$ 厘米 $^{-3}$ (在退火后增加),补偿层的厚度取决于质子轰击的能量,大约每100千电子伏特质子能量为1微米厚,质子的剂量是 10^{15} 厘米 $^{-2}$ 。衬底的浓度对传输波导的模式有关,最佳的衬底浓度是 2×10^{18} 厘米 $^{-3}$,极限值是 6×10^{17} 厘米 $^{-3}$,在浓度为 4×10^{17} 厘米 $^{-3}$ 时就发现没有导波现象。这种波导的缺点是由于陷阱激发载

流子会产生吸收波长比禁带宽度长的光源，因而使吸收损耗增大。为了降低这损耗，曾用退火的方法，使形成补偿层所需的陷阱减少到最低限度，从而降低吸收损耗。一些实验结果表明，在质子注入能量为300千电子伏特，质子剂量 2×10^{16} 厘米⁻²，温度为 500℃ 下退火一小时，所形成的平面波导在1.15微米波长的光波传输时，它的损耗为8.6分贝/厘米。

另外，再简介一下构成波导的另一种方法，即掺入第三种元素如Al或P，来改变材料的组分的方法。

已知几种常用 III - V 族化合物的折射率数据如下表：

化 合 物	折射率(n) $\lambda = 1$ 微米	晶格常数 (埃)	禁带波长 (微米)
GaAs	3.3	5.64	0.87
AlAs	2.9	5.66	0.58
GaP	3.0	5.45	0.45
InP	3.1	5.87	0.92
InAs	3.5	6.06	3.4
GaSb	3.8	6.09	1.77

用这种方法业已制成一些掺杂其他元素以改变材料组分的波导，如与GaAs材料晶格匹配较佳的AlGaAs固溶体波导。在GaAs衬底上先生长一层折射率稍低的AlGaAs作隔离层，然后再生长一层GaAs材料作波导层。为了使波导区中光波最少透过隔离层进入衬底而引起损耗，就必须考虑有合适的隔离层。实验表明：在单模传输波导中，波导层厚1微米，组分Al_{0.05}Ga_{0.95}As，隔离层厚为4.3微米时，损耗为4分贝/厘米。当波导层增厚或折射率差增大时，要求隔离层就较薄。这种波导的光损耗主要不是由于自由载流子所引起，而是液相外延层的边缘粗糙所致。

还有双异质结埋入波导，这种结构的GaAs层的上下都是GaAlAs层，它是一种对称波导形式，在这种波导中为了避免高次模，必须使波导层较薄，在组分为Ga_{0.7}Al_{0.3}As时，波导层的厚度为 $\lambda/2$ 。但当波导层太薄时，光波会从波导层中“漏出”，实际上波导层的厚度应该 $> 0.2\lambda$ 。这种波导经常用于集成光路的激光器和调制器中。

从上面可以看出，由于GaAs衬底的折射率高于GaAlAs层，所以通常单层GaAlAs层不发生波导作用。但若使所生长的Al_xGa_{1-x}As层中的Al浓度(x值)呈梯度变化(在接近表面处Al浓度最低)，则相应的折射率亦呈梯度变化(在表面处折射率最高)。用薄液层外延生长法，可生长出具有梯度层的GaAlAs薄膜，这是利用Al的分凝系数远比Ga要大，所以在液相外延生长中它比Ga先结晶析出，而所用的溶液又是有限的，致使AlGaAs层的表面处Al浓度较低。用这种方法制成的平面光波导的损耗，在 $\lambda = 0.93$ 微米时，损耗约7分贝/厘米。

另外，从上表所列数据可以看出，InAs和GaSb的折射率要比GaAs高，所以在GaAs衬底上生长单层GaInAs或GaAsSb可望获得光波导。业已报道制成了GaInAs光波导，但由于晶格失配较大，以及光源匹配问题，目前进展不大。国外还有研究在GaAsP表面采用阳极氧化生成一层氧化物薄膜的方法，制作光波导。

光波导的结构：

从目前集成光学的研究动向来看,薄膜波导的结构形式主要是槽形结构,又称矩形波导。通常有三种不同的型式:(a)脊形波导——它的槽形波导膜突出在衬底表面,是在平面波导膜上采用离子刻蚀或化学腐蚀方法而形成,这种波导具有很好的二维限制性,对边缘平整度要求很高。(b)埋入波导——波导膜被埋入在折射率较低的介质层中。(c)条盖波导——这种波导是在平面波导膜上淀积条形上盖层以实现它的二维限制性。下面我们分别地简介一下一些典型结构的例子。

(a)脊形波导:这种光波导具有介质边界,它们容易形成天线而辐射能量,而在整个剖面的折射率是突变的,从而形成多模传输波导。其优点是槽形之间没有串音干扰。脊形波导通常是光刻后腐蚀形成,分辨率限制在1微米左右,由于脊条壁的粗糙引起光波散射较为严重,有时高达60分贝/厘米。从而使它的应用受到了严重的限制。用液相外延法通过掩模在GaAs衬底上生长脊形波导是很困难的,但是国外于1974年业已成功通过氧化物作掩模,采用气相外延法在GaAs衬底上生长出良好的台面,可用于脊形激光器。

(b)埋入波导:它的波导区可以通过质子轰击方法形成。槽形是用金作掩模(2微米)。它的损耗与平面波导相同(7分贝/厘米)。这种波导另一种形式是在GaAs衬底上用分子束外延淀积一层GaAlAs(作隔离层)再淀积一层GaAs(作波导层),最后再覆盖一层GaAlAs。最低损耗小于4分贝/厘米。

(c)条盖波导:这种波导是模拟微带结构,它是目前最好的二维波导结构,因此国外在这方面的研究比较活跃。有三种类型GaAs条盖波导器件:介质条盖波导、金属间隙条盖波导和电光条盖波导。在这些波导中光波都被约束在条盖下面而不是在条盖内,它的显著优点是光的约束不直接受到条盖图形粗糙度的影响,以及条盖可以保障波导内光传输的模式,容易做到在波导之间的耦合和开关。

(i)介质条盖波导:美国麻省理工学院林肯实验室制成的介质条状波导是在n型GaAs衬底(浓度 1×10^{18} 厘米 $^{-3}$)上用气相外延(AsCl $_3$ /Ga/H $_2$ 系统)方法控制气相掺杂剂硫的浓度变化,生长出二层不同折射率的外延层,第一层掺杂浓度为 1×10^{16} 厘米 $^{-3}$,厚度是5微米;第二层浓度 6×10^{17} 厘米 $^{-3}$,厚度2微米。然后对第二外延层,用0.1M NaOH—0.7M H $_2$ O $_2$ 溶液作选择腐蚀,形成条状波导,条状宽度是5~30微米,损耗为4.3分贝/厘米。

这种介质条状波导的最近进展是采用离子注入方法形成GaAs $p^+-n^- -n^+$ 结构。波导的制作是在n型GaAs衬底(浓度 1.2×10^{18} 厘米 $^{-3}$)上气相外延生长 n^- 层(浓度 $\sim 1 \times 10^{14}$ 厘米 $^{-3}$, $\mu_{77} = 108400$ cm 2 /Vs)厚度10微米, p型层是用离子注入Be, 它的剂量是 $1.2 \times 10^{14} \sim 1.5 \times 10^{14}$ 厘米 $^{-2}$, 注入能量是从100Kev到400Kev, 在700℃下退火15分钟。用溅射Ti(300埃)作掩模,以标准光刻技术腐蚀成条状(高2微米,宽7~27微米),这种波导在1.06微米波长时,损耗约6分贝/厘米。这种器件的 p^+-n^- 结上加置反向电压后可用作GaAs调制器和定向耦合器。

条状波导的一个特例是平板(rib)波导,它的条状和下面波导层具有相同的折射率。国外报道了用阳极氧化腐蚀GaAs-Al $_x$ Ga $_{1-x}$ As单异质结平面波导形成二维平板波导。用液相外延法在GaAs衬底上生长Al $_x$ Ga $_{1-x}$ As外延层($x = 0.3$, 厚度3微米),再生长 ≥ 0.8 微米厚的不掺杂GaAs层,然后用30% H $_2$ O $_2$ 溶液(pH = 2)进行阳极氧化腐蚀形成所需图形。GaAs层的厚度为0.7~1微米,脊的阶梯高度是0.1微米,脊的宽度是5微米的波导,在表面粗糙度为 ~ 500 埃时,波导的吸收损耗为7.3分贝/厘米(在1.06微米时)。在实验中还看到波导的损耗是随着平板宽度增加而增大。

(ii)金属间隙条盖波导:金属条盖波导是在平面介质波导上淀积(电镀)金属条盖而形成的。在介质层上覆盖金属以降低折射率,光波被限制在金属间隙的介质层内。这种波导的制作是在n型重掺GaAs衬底上气相外延生长轻掺(浓度 10^{16} 厘米 $^{-3}$)外延层厚度2~5微米,从而形成不对称平面波导,然后用SiO₂作掩模,用标准光刻技术腐蚀出窄条(条宽5至25微米),最后进行选择电镀或蒸发金属条盖。曾试验过Au, Ni和Pt,其中以Pt为最佳,对间隙宽度为5微米和15微米的波导,测得的损耗是9分贝/厘米和4.6分贝/厘米。间隙宽度较窄的波导衰减较大,这是由于光在窄的波导中比在宽的波导中容易发散。一般介质层与覆盖金属的介质层之间折射率差约为 $2\sim5\times10^{-4}$ 。这种金属条盖波导的优点是容易加工,加工精度对波导的损耗影响较小,而且它还可用作有源器件,如电光衰减器等。

(iii)电光条盖波导:电光条盖波导就是根据电光效应(Pockel效应)设计的波导器件。它的结构是在n型重掺GaAs衬底上用气相外延生长轻掺(浓度 10^{16} 厘米 $^{-3}$)外延层(厚度2.5微米),再用选择电镀方法在外延层上制作一窄条Pt-Au肖特基势垒接触层,这过程与上述金属条盖波导是相同的。这种器件由于Pt-Au电极象损耗介质一样对光波有强烈的衰减作用,因此在这电极下面几乎探测不到光波通过。但当在肖特基势垒电极加上反向偏压后,光就被限制在金属电极之下,产生光波导作用。这种波导的损耗较高,约35分贝/厘米 $^{-1}$ 。但由于这种器件仅在加电场时才会出现导波作用,所以它可用作调制器/开关等方面器件。

(二)波导调制器

用改变光波的振幅、频率、相位、强度、偏振状态等参数实现信息传输的方法称为光调制。进行光波调制的装置称为光调制器。

在集成光学系统中,根据调制时激光器的参数是否改变,光调制器可分为光源调制器(腔内调制,内参量调制)和光波导调制器(腔外或外参量调制)两种。

在单片集成光路中采用的半导体注入激光器是容易通过改变注入电流而进行直接调制的。这就是半导体注入激光器作为最有希望的集成光源原因之一。然而,注入半导体激光器的内调制带宽受到载流子和光子寿命的限制,只能达到千兆赫水平,同时又不能使光束偏转,故还需要发展外参量调制器——波导调制器来改善半导体注入激光器的输出性能。如提高相干性,减少发散角等,并且也简化宽带调制系统的复杂性。

目前已实现了电光、声光、磁光等多种不同的调制机构,但从GaAs材料的集成光路来考虑,以电光调制器易于实现,其突出的优点是功耗小、光场在波导内高度集中,通常达到同样调制效果所需的功耗带宽比体器件要低2~3个数量级。所以我们着重介绍电光调制器——利用电光效应实现光波调制的器件。

1. 电光调制器

如前所述, GaAs晶体材料外加电场能导致双折射现象(Pockel效应)和双色性电吸收(电吸收效应)。目前国外利用这两个效应已制成了各种类型的电光波导调制器,其调制功率已达到微瓦/兆赫(拉特)²水平,调制电压只要求十分之几伏到几伏/拉特,调制带宽可以做到从几千兆赫到10千兆赫,利用几伏电压可以达到80%以上的调制百分率和开关效率。由此可见,电光波导调制器比相应的体器件在光导纤维通信中具有更大的优越性。例如利用Pockel效应,以GaAs材料制成的相位(振幅)调制器,其作用原理是鉴于在波导调制器中平面光波两个互相垂直的TE模式和TM模式的相速度不同,在外电场作用下要发生相对变化,因此光波在经过一段调制距离后,不仅要产生与原来的相速度差相应的相位差,而且要产生

与外电场相关的相位差。补偿掉前者以后,适当检偏也能得到振幅调制作用。

德克萨斯仪器公司Campbell等人报道了这种调制器的典型结构。它是在〈100〉取向低阻GaAs衬底上,气相外延生长波导层(浓度 $\sim 10^{15}$ 厘米 $^{-3}$)厚度2.5微米,在肖特基Pt-Au电极下形成二维波导。当加上反向偏压超过40伏以后,光波能量急剧增加,调制能力超过95%。

在1975年美国康乃尔大学电气工程会议上介绍了介质条状调制器,它是在N型的GaAs介质层上形成P型条带(浓度 10^{19} 厘米 $^{-3}$)。当P-n结上加置偏压时,波导区的折射率随偏压而变化。若所选择的晶向的电光性质,对折射率是负的,则加偏压以后光波就从波导中被“排除”出去。调制能力达到10%,但损耗较高(43分贝/厘米)。这是由于电场扩展所致。所以目前正在研究用降低受主浓度来减小损耗。

根据电吸收效应,国外还制成了GaAs-GaAlAs双异质结电吸收波导调制器,它是四层结构,第一和第三层是n型的 $\text{Ga}_{0.85}\text{Al}_{0.35}\text{As}$,第四层是P型GaAs,第二层是n型GaAs(或 $\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$),浓度为 1.5×10^{17} 厘米 $^{-3}$,厚度为0.7微米高折射率的波导层。在9100埃 $\sim$ 9150埃波长时,消光比为31.1分贝。这种调制器电场范围可用载流子浓度和波导层的宽度来控制。

Reinhart等人制成的高效率GaAs—GaAlAs双异质结偏振调制器,只要加10伏反偏压,就能得到 π 弧度的相位调制,波长在1.15微米时,可达4千兆赫调制带宽。

Reinhardt于1973年报道了 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ — $\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{As}$ 双异质结波导电吸收效应的实验,在不大的反偏压下,对于光子靠近禁带宽度的光波(不小于60毫电子伏特)获得了强烈的电吸收,在10伏电压下,吸收系数高达100厘米 $^{-1}$,在90%强度调制下需要调制功耗带宽比为0.1毫瓦/兆赫。

此外,还有利用 LiTaO_3 和 LiNbO_3 制造电光调制器的。如Hammer等人在 LiTaO_3 衬底上扩散金属铌制成了低损耗的 $\text{LiNbO}_3\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ 电光调制器,在低于6伏电压下,对于6328埃光波长,调制效率超过80%。

Kaminow等人利用 LiNbO_3 外扩散平面波导制作了高效率宽带电光相位调制器,调制指数与电压之比为0.13伏 $^{-1}$ 。利用50欧姆负载,最大基带宽度为3.2千兆赫。他们还在Ti扩散的 LiNbO_3 波导上制作了条盖波导电光相位调制器,在0.63 μ 波长对于1拉特调制指数,调制电压为0.3伏,功耗带宽比为1.7微瓦/兆赫。

另外,还有波导定向耦合电光调制器当两个平行波导彼此相距很近时,它们的衰减场彼此重叠就引起了耦合作用。定向耦合器就是基于这个原理。在集成光路中利用定向耦合器,可以完成多种功能,如功率转换、选频、选偏振等。在施加调制电场时还可以实现调制开关等作用,它是多路光导纤维通信系统中不可缺少的器件之一。

Campbell等人采取了在金属条盖波导上加电场调制的方法,试验了电光定向耦合开关性能。

在重掺n型GaAs衬底上外延一层厚度2~5微米GaAs波导层(浓度 10^{15} 厘米 $^{-3}$),并选择电镀肖特基Pt, Au势垒,它的晶向是选择在加外电场时会引起金属层下面外延层的有效折射率的降低取向。这样就构成了两根平行的二维波导,基本上是相匹配的,最低损耗为7分贝/厘米。实验测得它们之间的最大功率转换高达95%,带宽为100兆赫,功率带宽比为180微瓦/兆赫。Reinhart等人估计,若进一步降低肖特基势垒宽度,可望获得1千兆赫带宽。

2. 声光调制器

在薄膜光波导表面上传输的声波使波导薄膜的厚度和介电常数发生周期性变化,从而使光波发生散射,即为声光效应。利用这个效应构成的声光调制器也是一种光栅型调制器件。与电光调制器相比,声光调制器的功耗小,但带宽较窄(≤ 30 兆赫)。

Cheo等人对GaAs波导膜($\lambda = 10.6$ 微米)进行了共线调制和布拉格衍射调制试验,获得的效率比体器件的理论值高出2个数量级。还有以GaAs等半导体材料制成的声光调制器,在声频200兆赫时,可获得70%的调制速率。

Tsai等人在Y切割的LiNbO₃上制作了两个相互倾斜的声波梳状换能器,发射两束交叉的声波,可使声光调制器的带宽提高一个数量级(约200兆赫),衍射效率为50%,功耗仅200毫瓦。

3. 磁光调制器

磁光调制器是利用在磁场作用下在某些物质中传输的线性偏振光的偏振面发生旋转的法拉第效应制成的。

Tien等人在外延的铁-石榴石/镓-石榴石波导上进行磁光调制和开关试验,利用一个来回弯曲的电极结构获得了TE和TM模式间的同步,即让电极来回弯曲的周期为 $2\pi/\Delta$ (Δ 为TE和TM模式的相位失配),在0.5A直流偏置下获得52%的模式转换效率,该器件灵敏度很高,只需1/100Oe的调制磁场即可进行开关。

4. 注入载流子调制器

在GaAs波导中注入载流子(用光注入或电注入方法),由于自由载流子引起严重的光吸收,并使注入区域的折射率降低,可以有效地使光导波衰减或偏转。

Logan等人用注入载流子的方法在GaAs/GaAlAs单异质结波导层中实现了载流子调制。用光注入方法时,当UVN₂激光器发出的光脉冲为10ns,注入载流子浓度较大时($< 5 \times 10^{18}$ 厘米⁻³),可以完全截断TE模式的光波导,而在注入载流子浓度较小情况下,能使光束有足够的偏转,从而使它比Cheo报道的电光偏转高出一个数量级。

用电注入方法时,在GaAs波导上生长一个P型GaAlAs台面,并淀积条形金电极,在100安/厘米²的电流脉冲下(25毫微秒),获得了显著的振幅调制。如果将金电极侧放,可以在很低的电流脉冲下得到100%的振幅调制。

(三) 探测器

探测器的作用是将光波信号转换成电信号。因此在探测器中首先需要吸收光波能量将载流子从价带或陷阱中激发到导带,然后利用肖特基势垒或结电场把它收集起来。下面简介一下集成光路中采用的探测器结构。

1. 外延生长探测器

为了把探测器结合到集成光路中去,利用禁带宽度比波导小的材料制作探测器。一个典型的例子是在GaAs材料中掺入第三种元素In,使禁带宽度变窄,形成探测器。

Stillman报道的In_xGa_{1-x}As肖特基势垒探测器,其结构是在低阻GaAs衬底上气相外延生长一层5微米厚的GaAs层(纯度 $n = 10^{18}$ 厘米⁻³)作为光波导,再淀积一层SiO₂作掩模,光刻出 $\phi 125$ 微米小孔,用化学腐蚀方法除去孔内GaAs后,外延生长InGaAs层(10^{18} 厘米⁻³),抛光磨去多余的InGaAs及掩模,蒸发上一层Pt肖特基势垒。这种器件的雪崩增益为250,量子效率高于50%。由于它受到电容所限制,带宽为2千兆赫,只要掺杂浓度和几何尺寸匹配,就

能获得100%的探测效率。存在的问题是InGa与GaAs的晶格失配较大。

2. 质子注入探测器

在高能质子注入GaAs材料时,材料中产生了许多深能级陷阱,俘获了大量载流子,提高了材料的介电常数。利用这种方法制成的光波导损耗较大,虽经退火处理仍不理想。现在反过来,利用高能质子,注入低损耗的GaAs或GaAlAs波导,以便构成探测器。这样,探测器在注入质子的区域内波导吸收损耗大大增加,只要适当控制工艺,如退火条件等,就能形成适合探测器所需的光吸收。所报道的实验结构是在n型重掺GaAs衬底($N_d = 1.25 \times 10^{18} \text{ 厘米}^{-3}$)上外延生长掺硫($n = 10^{16} \text{ 厘米}^{-3}$),波导层厚度是3.5微米。注入区在波导层的右端,注入能量是300千电子伏特,损伤层厚度约3微米,在500℃温度下退火30分钟后,再在注入区表面上淀积铝肖特基势垒(11密耳),加上足够的反偏压,耗尽层一直延伸到衬底,用以收集深陷阱激发的自由载流子。这种器件对 >0.9 微米波长比较灵敏,响应时间小于200毫微秒(用YAG激光器Q开关脉冲测量)。这种工艺也可用于制备GaAlAs探测器。

3. 电吸收探测器

在电吸收过程中,伴随着电子空穴对的产生(光电流),而且电吸收对能量与带宽相近的光子是十分强烈的,因此双异质结GaAlAs电吸收器件(波导层与耗尽层相结合),完全可作为集成化光探测器。美国林肯实验室Stillman等人对GaAs电吸收雪崩光电探测器进行了研究。他们制成的器件,其结构是在 n^+ GaAs衬底上生长高纯的n型GaAs外延层,厚度20微米,在衬底上制作欧姆接触层,外延层上制作约100埃厚半透明Pt肖特基势垒,在器件有源区(直径125微米)周围用高斯质子轰击法使GaAs形成高阻层,Pt肖特基势垒上用热介SiO₂层保护,管芯是封装在变容管管壳上进行光电测试。

(四)激光器

薄膜激光器是集成光路中主要元件之一,它应满足如下要求:

- a) 具有薄膜化、平面化的结构,可与光波导等元件集成在同一衬底上。
- b) 室温连续单模工作。这是为了获得有效的耦合,足够的带宽等所必须具备的条件。
- c) 工作寿命在 10^5 小时以上。
- d) 激光频率稳定,随温度等因素漂移小。
- e) 激光频率与光纤维相匹配,大致在0.6~1.7微米波长范围内。

1. 注入式激光器

目前最有希望成为集成化光源的是用GaAs-GaAlAs材料构成的法布里-珀罗注入式半导体激光器。

法布里-珀罗激光器的谐振机构是一对解理端面。这种器件是直接从解理端面输出,即由于在解理端面两侧存在较大的折射率差,才使其有可能激射。但是作为集成光路的光源,必须把激光器与光波导集成在一起,但是在形成集成化结构以后,激光器端面上折射率差将降低,器件将得不到所需的反馈量,不会激射。因此,将光波导与这种激光器的有源区直接连接是不可能的,需要在波导层与有源层之间填充一种低折射率的过渡介质,或者改变光输出方式,将波导层移置于有源区之下,通过定向耦合作用而输出。这二种方法的共同特点是保留了谐振端面,通过改变解理工艺及光输出方法来达到集成化的目的,所以这种激光器也称作谐振腔式集成光源。

为了满足集成光路的要求曾对这种激光器从以下三个方面作出改进,一是改善器件的单

色性，二是提高寿命，三是解决集成化问题。其中寿命问题是半导体激光器的关键问题，目前双异质结 GaAs-GaAlAs 法布里-珀罗激光器寿命已达 10^5 小时以上，一般认为双异质结层间晶格失配及电极接触引起的内应力是导致器件退化失效的重要原因，另外衬底材料质量对器件寿命也有显著影响，所以国外在这方面的研究工作非常活跃。

单色性不好是半导体激光器的主要缺点之一，因为半导体激光器的发光机构是载流子在能带间的跃迁，器件的自发辐射光谱宽度近 200 埃，经过一对介理面谐振腔纵模后，激射的线宽仍有 10 埃左右。后来通过发展双异质结条形结构对横模施加二维限制，并通过外腔机构改善纵模选择性，使器件的光谱半宽度降低到零点几埃，甚至百分之几埃。集成化光源的新问题是改进法布里-珀罗激光器的分立结构。下面将这些方面的发展情况简介如下：

通常双异质结半导体激光器的激射是从 GaAs 有源区介理面激发出，电流和光被限制在有源层周围的 GaAlAs 层，因为有源区很薄（在 0.3 微米以下），从这样小的发射区的衍射使异质结激光器具有很宽的发射光束（但单色性差），若能在激光器的有源区集成了宽的无源波导就能使输出光束变窄。由光源发出的激光最好能直接透射入光波导中。因此研究集成光源的结构是要达到通过改变介理工艺及光输出方法以改进激光器的性能而实现集成化的目的。国外在这方面主要采用了三种方法：组分耦合方法，尖劈耦合方法和消失场耦合方法。

（1）组分耦合激光器：这种器件的结构是用液相外延方法同时生长有源区和无源区。当无源区（波导层）生长得较厚时，激光的输出发散角变小，波导层的 Al 组分，大于有源层，以保证无源波导层的导波作用。用这种方法制成的双异质结激光器远场发散角，比一般的双异质结激光器要减小三分之一。若用二步生长方法即把长成的激光器台面腐蚀去一半，再用气相外延生长无源波导层（厚 12 微米），所得的器件发散角能减小 30 倍。

（2）尖劈耦合激光器：这种器件的结构是在 GaAs 有源区一端生长尖劈层，使其起着尖劈耦合作用，把光耦合到下面无源波导层，使光限制在波导层中。其远场发散角为 30° 。

（3）消失场耦合器（又称集成化双波导（ITG）激光器）：它是日本末松安晴等人提出来的，消失耦合是通过二个波导之间传播矢量的相匹配来实现的，光的传播是从一个波导通过中间插入另一低折射率的波导进行的。这种激光器基本上是一种双异质结激光器，反馈端面利用氟离子刻蚀而成。这种激光器有两个波导层，通过消失场进行耦合，构成一个波导定向耦合器。在相匹配条件下有可能获得有效的光输出。存在的困难一是为了满足相匹配条件需要严格控制两个波导层之间的参数，同时为了有效的耦合，二个波导间距应尽可能小；二是刻蚀端面还不够平整。这种激光器激射光谱较窄，仅为普通法布里-珀罗激光器的三分之一左右。

2. 分布反馈激光器

这种激光器是将集中于介理面器件端面的反馈作用分布于器件的内部，用一种平面化集成化的反馈机构去取代介理面反馈，从而解决器件集成化问题。

分布反馈激光器是由贝尔实验室的 Kogelnik 和 Shank 于 1971 年首先提出来的，并在染料激光器上进行了成功的实验。

这种激光器最有代表性的是由中村与 Yariv 等人制成的双异质结 GaAs—GaAlAs 分布反馈条状激光器。这些激光器是用液相外延生长的，采用全息曝光和离子刻蚀在有源层顶部刻出了周期 $\lambda = 0.34$ 微米（3400 埃），深度为 900 埃的槽形。这种器件线宽是 0.3 埃，阈值电流密度几千安/厘米²，只能在 $80 \sim 100^\circ\text{K}$ 温度下脉冲工作。他们在 1975 年又研制了分别限制 GaAs-GaAlAs 分布反馈条状激光器，将周期性结构与有源区分开，用选择化学腐蚀方法

代替离子刻蚀方法,并采用金刚石热沉方法改善了散热条件,实现了室温连续相干,阈值电流 3.5千安/厘米^2 ,输出功率10毫瓦,但估计寿命还有些问题。为此Reinhart等人于1975年又研制了分布布拉格反射式(DBR)激光器,它是将周期结构制作在有源区两端的无源波导区域表面上,通过尖劈薄膜把波导区与有源区耦合起来,实现了室温脉冲工作(100毫微秒),阈值电流约为 5千安/厘米^2 。

分布反馈激光器除了可与光波导连接实现集成化以外,它还有高度的频率选择性,较低的阈值增益,良好的纵模和横模选择性,以及工作寿命可能较长的特点。它的主要缺点是要高质量的多层外延结构以及在 $1000\sim 3000\text{埃}$ 左右精细的周期结构。

(五)集成化器件

近几年来,国外主要是致力于用不同的材料制作单个波导器件。但是从集成光学长远发展来看,必须找出一种适合于集成化的材料,在此基础上进行光学集成。在近红外波段,Ⅲ-V族化合物,特别是GaAs及其有关合金,对于重要的光学器件集成具有独特的优点。如果光源、调制器、波导、定向耦合器和探测器不要求做到最理想的话,GaAsⅢ-V族化合物就能满足这个要求。另外,这些材料的处理技术已相当成熟,如高质量的气相和液相外延技术,还有分子束外延技术也正在迅速发展中。

目前国外对于分立的GaAs波导器件在技术上已趋于成熟,但是对于这些器件的集成化或集成光路的研究还处在探索的阶段。1974年Reinhardt等人曾报道了有关GaAlAs有源双异质结激光器与调制器集成化的试验,成功地解决了两者之间的集成问题。以后他们又报道了通过尖劈薄膜耦合集成的GaAs-GaAlAs激光器和调制器的试验,从双异质结激光器有源层发出的光波经过尖劈耦合至波导层中,在20伏反偏压下得到了振幅调制。在功耗带宽比为10微瓦/兆赫条件下,调制深度90%。1975年Garmire报道了把激光器、调制器、探测器集成在一起的集成化器件,它也是利用尖劈耦合技术把激光区发出的光耦合到下面波导层进行调制,经调制的光再注入探测器。这种器件采用液相外延方法和化学腐蚀方法或者离子腐蚀方法进行加工。调制器是加负偏压工作,探测器是利用p-n结加偏压将吸收光转变成空穴电子对产生光电流。最近Merz报道了用化学腐蚀工艺形成反射面,把激光器、波导和探测器集成在同一GaAs衬底上,器件总长约1毫米,初步试验微分传输率可达10%。

至于单片集成光路,在1975年光电设计会议上林肯实验室的Milngailis提出了一种简单的集成光路,可望用于光纤通信系统中的终端机。为了实现这种集成光路,重点放在发展低损耗的高纯度外延GaAs波导、波导探测器、调制器和双异质结GaAs-GaAlAs激光器。与此相似的是德克萨斯仪器公司Blum等人提出的集成化光发射器,它主要由激光器、条状波导、调制器、定向耦合器(有回路开关)构成。目前已经制成了集成在同一GaAs衬底上的集成光路分立器件,这些分立器件已进入集成化功能的试验阶段。但还存在着不少问题,如集成化薄膜激光器的寿命,光波导的损耗,探测器的响应速度等等。1975年贝尔实验室曾首次报道将激光器与调制器,滤波器与光波导一类器件集成在 $6\times 15\text{密耳}$ 的GaAs衬底上,但它的功能还未见有报道。上述集成化器件主要采用组分耦合、尖劈耦合和消失场耦合三种方法来构成。

国外预计用GaAs-GaAlAs单片集成光路制成的发射器、中继器和接收器将在八十年代实现,而集成化逻辑运算回路在九十年代以后才能实现。

五、集成光路器件的制造工艺

所谓集成光路就是将薄膜激光器、耦合器、调制器、探测器等光学器件象集成电路那样集成在同一衬底上,构成一个具有独立功能的微型光学系统。由于材料和加工技术等问题至今尚未获得妥善的解决,目前集成光路实际上并不存在,但是组成集成光路的分立器件,如激光器、耦合器、调制器、探测器在技术上已趋于成熟,并付诸应用。它们的制造工艺基本上都是采用大规模集成电路、超大规模集成电路制造工艺,如气相和液相外延、电子束曝光, X射线曝光, 全息曝光, 离子腐蚀等超精细加工技术。但是制造集成光路所需要的加工精度要求达到亚微米级(10^{-10} 米), 其工艺的复杂程度超出了目前集成电路的加工技术水平。

所谓超精细加工技术是指加工线条小于1微米的器件图形的加工新技术, 它主要包括电子束曝光技术、X射线曝光技术、全息曝光技术和干法腐蚀技术(包括等离子体腐蚀、高频溅射腐蚀、离子腐蚀技术)等。将来能否实现集成光路, 在某种程度上讲超精细加工技术是决定性的因素。为了摸索和研究这种加工技术, 国外重点研究了电子束和X射线曝光技术, 特别是电子束曝光已被确定为新一代亚微米级图形加工技术的基础。选用电子束曝光和X射线曝光, 因为它们的波长比普通光刻法所用的紫外光短几百倍以上(电子束波长为1埃, X射线波长约为3~10埃), 用它们曝光0.1~1微米图形, 其精度不受衍射效应的限制。另外, 电子束在电磁场中可以高速、精确地偏转和调制, 其能量和剂量可以精确地控制。存在的问题是电子反向散射、带电容易引起失真等。目前日本超大规模集成电路共同研究所已研制出一种新型可变矩形的电子束曝光系统, 加工图形的时间仅为普通的电子束曝光系统的十分之一, 可以加工1~25微米范围内任意大小的矩形电路图形。

目前美国已研究成功用X射线面曝光技术加工超精细图形。它的特点是X射线穿透能力强, 反射和散射又很弱。存在的问题是加工的图形会产生偏移和模糊现象, 掩模对准比较困难。

同时, 国外也已研究成功用全息曝光技术加工超精细图形。它的特点是加工精度高, 失真畸变度低, 速度快, 操作方便, 不需要避光。并且与投影曝光和掩蔽曝光不同, 不需要掩模。存在的问题是容易引起光栅畸变。

由此可见, 随着上述超精细加工技术的不断完善, 以及存在的技术问题逐步解决, 今后一定可以用它们加工集成光路的图形。

其次, 国外对薄膜外延生长技术的研究也取得了重大进展。用分子束外延技术已生长出极薄的(几十埃至10埃)单晶薄膜多层结构, 而且膜厚能精确控制, 并能大面积均匀生长, 同时可以精确地控制化合物组分和掺杂剖面, 再现性也很好。目前贝尔实验室用分子束外延方法已制成层叠100层, 膜厚为几十埃的器件。存在的问题是晶体生长速度慢, 镓原子束只能生长厚约1微米的外延层。将来采用这种外延技术有可能生长出交变的异质多层周期性结构(即未得到验证的超晶格结构), 以及通过改变外延层的材料组分来解决集成光路中具有不同功能的器件制作问题。

最后, 生长多层晶体和曝光成象为图形以后, 就要用干法腐蚀技术刻蚀超精细图形。目前国外干法腐蚀技术已进入实用阶段, 如等离子体腐蚀、高频溅射腐蚀和离子腐蚀技术都可

作超精细加工。仅就亚微米级超精细加工而言,离子腐蚀效果最好,但腐蚀速度慢,不适合批量生产;而等离子体腐蚀工艺简单,能实现边腐蚀边除去抗蚀剂,比较适合自动化生产,且能形成尖劈剖面。Hosokawa 等人发明的反应气体高频溅射技术,用金属掩模能加工 1 微米的图形线条。据说将氟氯碳氢化合物引入放电室可把硅的腐蚀速率提高一个数量级。上述情况说明干法腐蚀技术已趋于成熟,今后它或许能解决制作集成光路超精细图形的腐蚀问题。

总之,国外为了解决集成光路的集成化问题,重点研究了如何将激光器发出的光有效的耦合到波导中去。而制造光波导和激光器的关键则是要解决光栅加工问题。目前看来以电子显微镜和电子束或 X 射线或全息曝光技术已能解决光栅图形加工问题,例如在 Ar 激光器发射 4580 微米波长条件下,用全息曝光技术在 AZ-1350 正型光致抗蚀剂上已形成了 0.37 微米间距的光栅图形。使用干法工艺也能加工光栅图形。先用等离子体腐蚀中间掩模图形,然后用离子腐蚀(离子束铣磨或高频溅射腐蚀)在 GaAs 衬底上刻蚀图形制作三级布拉格光栅(周期 = 0.36~0.37 微米),再用分子束外延技术生长 GaAs—Al_xGa_{1-x}As 层以形成分布反馈注入激光器,以及宽 10 微米、深 1.5~2.0 微米的脊形条状波导。Ostrowsky 用电子束曝光技术制成了三维波导(5~10 微米宽)、定向耦合器,以及平面波导之间的谐振环。

六、集成光路的应用领域

集成光路的潜在应用领域主要是在光导纤维通信和光信息处理方面,现简介如下:

(一)光通信方面应用

利用光导纤维作传输介质的光通信是在六十年代末提出来的,迄今发展非常迅速,在技术上已趋于成熟,即将进入实用阶段,这可以从组成光通信的必要因素如光导纤维、激光器及通信设备的发展看得出来。目前国外光导纤维每公里最低损耗只有 0.47 分贝,平均损耗 10~20 分贝,抗张强度 60 万磅/平方英寸,制成的光缆最低损耗达到 2、4、10 分贝/公里。激光器输出功率达到 250 毫瓦;激光器寿命一般达到 1 万小时以上,最高为 10 万至 27 万小时。GaAlAs 激光器实验室里长期加速老化试验寿命高达 100 万小时;光电转换式数字通信设备早已付诸应用。因此,国外已有不少试验性光通信系统投入运行。例如美国贝尔电话实验室和西方电气公司于 1976 年和 1977 年相继在亚达兰大(10 公里)和芝加哥(2 公里)试验光缆通信系统获得成功。另外,还敷设了一条 64.4 公里长的试验性光缆通信线路,共设置了 11 个中继放大站,最高传输速率达到 1 千兆比特/秒,光缆平均损耗 6 分贝/公里。美、英、日、西德等国家计划筹建的光缆通信系统,其数量就更多了。目前建成的光缆通信系统,其最大传输容量只有 50,000 话路,与光通信在理论上可同时传输 100 亿话路的巨大通信容量简直是无法相比拟的,同时也远远比不上毫米波通信系统目前达到的 25 万话路通信容量。

但是从决定光缆通信系统总容量的光导纤维传输带宽、光缆中所包含的光纤芯数和光源的调制速率等因素来看,目前光纤的带宽已提高到接近 10 千兆比特/秒。若用贝尔实验室在芝加哥试验中使用的 144 芯光缆,系统中继距离假设为 30 公里,则可传输约 60 万话路;若用法国电缆公司制成的 19 单元、每单元 18 芯(共 342 芯)光缆,中继距离仍为 30 公里,则至少可传输 150 万话路。将来随着纤维光学技术的进展,把光导纤维的带宽提高到 1000 千兆比特/秒/公里(接近理论极限),将光缆通信系统的总容量再提高 10 至 50 倍,即可同时传输几千万话路,