

国外集成光学

Guowai Jicheng Guangxue

上海科学技术文献出版社

国外集成光学

中科院上海冶金研究所 编译
上海科学技术情报研究所

*

上海科学技术文献出版社出版

(上海高安路六弄一号)

新华书店上海发行所发行

上海新华印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 7.75 字数: 200,000

1979年10月第1版 1979年10月第1次印刷

印数: 1—10,900

书号: 15192·37 定价: 1.00元

《科技新书目》128—89

128/39

前言

集成光学是六十年代末期在集成电子学和激光技术的基础上发展起来的一门新兴边缘学科,它是光电子学的一个重要分支。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,已引起了美、日、西欧各国的重视。近年来,通过开展大量的理论研究和探讨,以及对集成光学器件制造工艺的不断改进,已使集成光路的研制技术取得了一定的进展。目前,分立的集成光学器件都已制成,但实现单片集成光路的最后目标还有待于所用的材料和制造工艺的进一步发展而逐步解决。国外估计集成光路可能在八十年代突破,九十年代才能普遍付诸实用。

本译文集主要包括:集成光学器件基本原理及结构的综述、理论分析、制造工艺及应用等内容。

本辑共包括十七篇译文,主要由上海冶金研究所和上海科技情报所译校。在译校过程中曾得到有关单位的大力协助,特此致谢。

由于我们水平有限,错误和不妥之处在所难免,请读者批评指正。

编者

1978年6月

目 录

1. 集成光学器件的现状·····	1
2. 日本集成光学的进展·····	7
3. 日本光波导器件最近的研究活动·····	10
4. 集成光学中的周期结构·····	12
5. 红外电光波导·····	34
6. 集成光学的液晶光波导·····	41
7. GaAs/GaAlAs 分布反馈二极管激光器 ·····	46
8. 室温工作的发射波长 1.1 微米的 GaInAsP/InP 双异质结二 极管激光器·····	50
9. 外延生长 YAG:Nd ³⁺ 波导激光器的特性 ·····	52
10. 集成光学用 GaAs 和 GaAlAs 器件 ·····	53
11. 发展单片 GaAs 集成光学发射机 ·····	67
12. GaAs 基片的集成光路 ·····	73
13. 单片激光器/波导的消失场耦合 ·····	78
14. 光学元件的集成化·····	80
15. 全息光栅槽形的控制·····	85
16. 在散射试样上使用集成光学方法的吸收光谱术·····	92
17. 声表面波器件及薄膜光学器件的制作技术·····	96

集成光学器件的现状

〔摘要〕 为了在薄膜技术中实现如发射,接收,开关,倍增和调制等光逻辑功能,已研制了许多导波器件。这些器件对于实现很高数据速率(每秒几千兆位)的单模光纤通信系统是必不可少的。本文评述了这个领域发展的技术水平。

引言

众所周知,单模纤维能够传输非常高的数据速率的光信号(每秒几千兆位数量级以上)。如果这些光纤象多模光纤一样,以某种方式(在那里一端连接激光光源,另一端连接高速探测器)简单地用作传输线,那么所有的逻辑功能,如开关,倍增等等,必须由电子系统来完成,而这些电子系统能起作用的速度是有限的,例如数字计算机的一个典型的电子母线通常有几十毫微秒或更长的时间延迟。由于很多电子元件和光学元件的连接引起的复杂性也会使加工制造这种通讯系统困难和造价昂贵。薄膜波导(即集成光学)元件的有效使用,对于实现很高数据速率的单模光纤通信系统是必不可少的。这种薄膜波导元件能完成很多光逻辑功能,如开关,调制,倍增等。本文将扼要地评述某些薄膜波导(即集成光学)元件技术的发展动向和它们与单模光纤的相互关系。

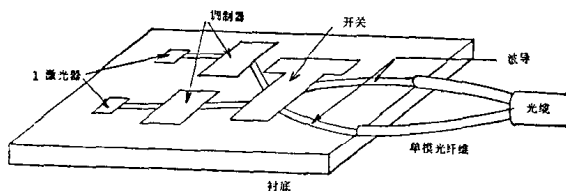


图 1 a

按照最简单的观点,我们可以设想如图

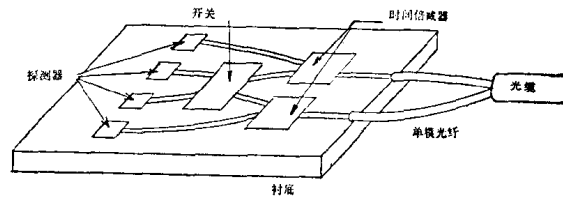


图 1 b

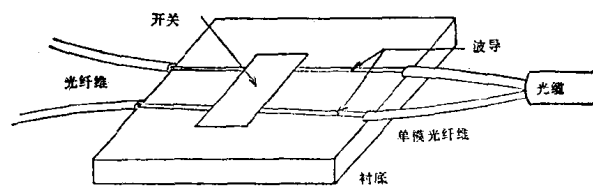


图 1 c

1 所阐明的未来光纤通信系统可利用薄膜波导元件来处理光信号。在此我们看到集成光学系统能够起到发射机(包括光源,调制器,定向耦合器和开关)或接收机或交换站的所有作用。对于这个假设系统了解和分析得最深入的是分立的薄膜波导元件,而了解得最少的是如何设计和评价各种光纤网络结构。在1977至1978年前美国海军将不会进行简单的单模光纤数据传输母线系统的首次实验。目前进行任何单模光纤开关网络实验的障碍是在于实现有效的光纤-薄膜耦合器。

任何器件的性能显然受所用材料性质的影响很大。如果几只器件如光源、调制器和探测器,能够理想地做在同一衬底材料上,这是最有利的。这就是单片集成光学元件。最适合做单片集成光学元件的材料体系是Ga-Al-As化合物和Ga-In-As-P化合物。各种

器件集成到单片集成光学系统的研究,在这次会议中将由 Garmire 博士提供的另一篇论文中讨论。另外,人们也希望用不同体系材料制成的各种器件都具有最佳的性能,然后从外部把它们连接成所谓混合集成光学元件。我们在这里将利用混合集成光学元件的概念,并对日前一些器件所能达到的性能加以评述。

薄膜波导

实际上集成光学系统与普通的光学系统不同之处是光波作为导波被限制在介质薄膜中传播。为了产生这种限制,波导必须具有高于邻近介质的折射率。对均匀的薄膜波导,这种限制被限定在垂直方向,示于图 2a 中。图 2b 所示的是槽形波导,它的水平方向也存在着限制。通过控制波导薄膜厚度和水平方向尺寸,以及波导与周围介质之间的折射率差异,人们就能够获得单模(或双模或三模)波导。

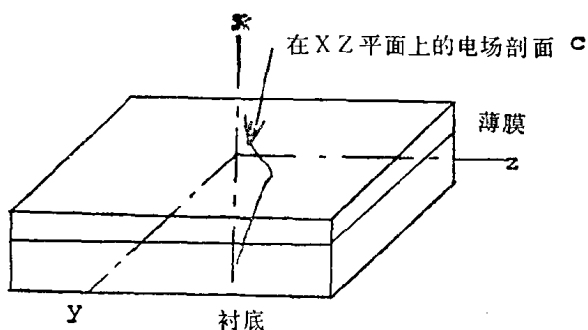


图 2a

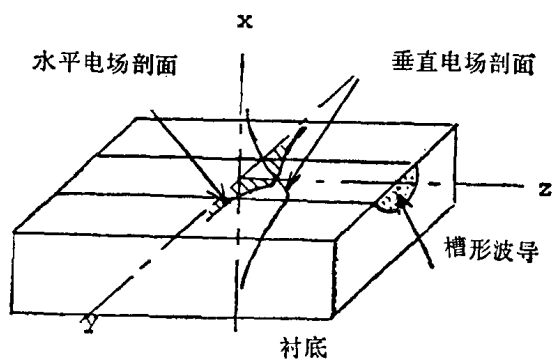


图 2b

值得注意的是每个模都有它独特的电场图和传播速度。最低数量级 TE 和 E^y 模式的电场图示于图 2a 和 2b 中。在均匀的波导中,模式通常被假设在水平方向有均匀的波阵面,并且在均匀的薄膜中任何方向都可自由传播。因为大多数光波导元件都小于几个毫米长,所以波导衰减在 1dB/cm 或更小的范围内可认为是很好的,而衰减远大于 3dB/cm 的波导,其应用就成问题。波导衰减主要是由散射损耗和材料吸收引起的。迄今为止,非常均匀的波导是用有机薄膜溶液淀积,化学气相淀积,蒸发,溅射淀积,扩散及在单晶衬底上外延生长等方法制备的。低损耗槽形波导的制备可以利用光感应率变化,掩模扩散工序,在现有均匀的薄膜波导顶部淀积介质条,以及利用波导槽形外面的金属薄膜来降低周围介质的有效折射率等方法。

相位匹配的相互作用和无源元件

如果人们想要制造任何一种无源集成光学元件而不出现过多的无法控制的辐射损失的话,人们就必须防止任何一个介质界面出现大梯级的不连续性。另一方面,折射率或薄膜厚度小梯级的不连续性,对波导模传播的影响将非常小。只要能够产生大量重复的不连续性以致每个梯级对相位的微小效应累积起来,于是总的效应就可能很大。这就是集成光学中相位匹配的相互作用现象。

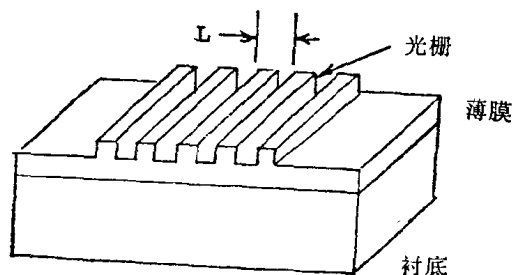


图 3

例如研究在均匀的薄膜波导上刻蚀很多波纹介质梯级(即光栅),如图3中所示。假定光栅的周期 L 是这样: $2\pi/L$ 等于 $2\omega/V$, 这里 V 是传播模式的相速度, ω 是光波的角频率, 那么由每一梯级正向传播模式的散射辐射将以反向传播模式同相位累积叠加。因此, 光栅将作为反射器。这样的反射器具有波长选择性, 因为相位匹配仅发生在非常窄的波长范围内。换句话说, 反射器也可作为窄频带滤波器。

基于正向散射的同样原理, 任何反向的波也会被光栅散射。对于给定的光栅长度, 在某一特定波长下, 反复的反向和正向波的散射本身就是同相的; 在此情况下这就成为一个谐振器。在这次会议中 Scifres 博士写的另一篇论文将描述应用这种谐振器可获得薄膜激光器的作用。这就叫做分布反馈激光器。

同样地, 相位匹配相互作用可以用来达到定向耦合。研究二个紧挨着的槽形波导情况看出二个模式消失尾是彼此重叠的。在此情况下两个波导是相互耦合的。如果两个相速度是匹配的, 能量就可从一个波导传输到另一个波导。反之, 如果二个波导模式具有不同的相速度, 相互作用将不会累积, 就不会产生很大的能量传输。因此如图4中所示的一种结构可以用来把特定的光能量从一个波导耦合到另一个波导。传输能量的大小取决于相互作用区的长度和相互耦合的强度。

也论证了使用适当的掩模淀积方法制备其他无源元件, 如薄膜激光器, 棱镜等等, 示

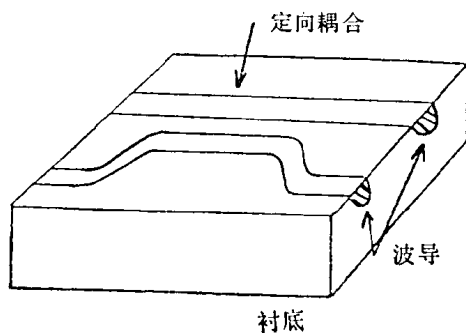


图4

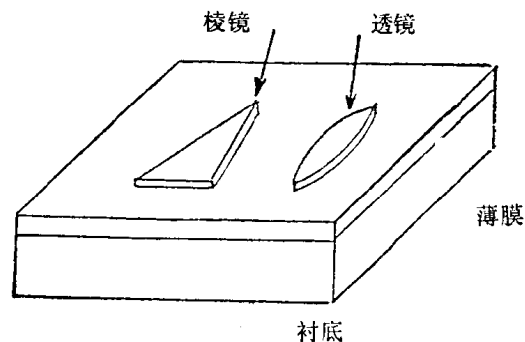


图5

于图5中。

波导调制器和偏转器

利用电光效应, 声光效应, 磁光效应及自由载流子注入几种方法, 已经获得在薄膜波导中光信号的调制。但是在每秒几千兆比数据速率范围内, 通常应用电-光调制是最有效的。

实际上所得到的电-光调制是由于施加电场可以改变如 GaAs, ZnO, LiNbO₃, LiTaO₃ 晶体等材料的折射率所致。例如图6所阐明的两种电光调制器业已被证实。

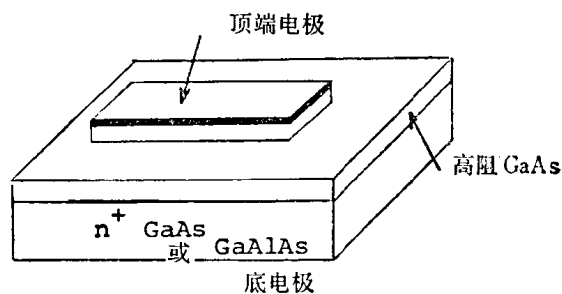


图6a

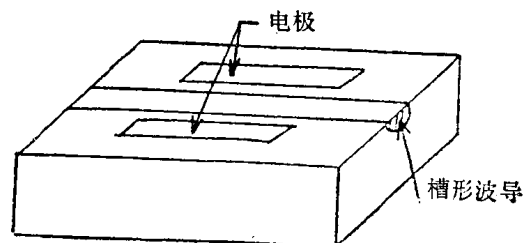


图6b

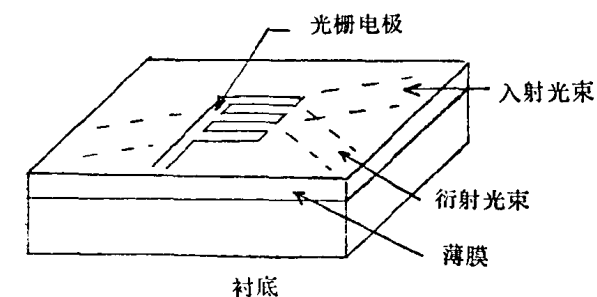


图 7a

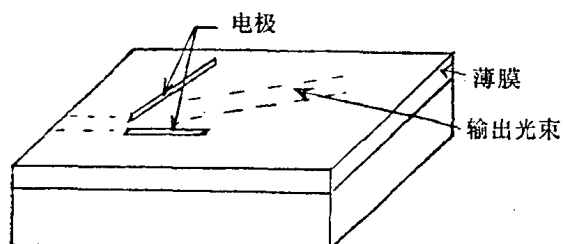


图 7b

在这两种情况下调制电极的电场改变了折射率，从而改变相速度和传播一定距离之后的模式相位。在均匀的薄膜波导中，类似光栅的电极也可用来形成折射率的周期性变化，示于图 7a 中。在此情况下，当加电压到电极上时，通过周期性的介质折射率变化，导波束可以衍射到新的传播方向。不加电压时入射光束就不扰动传播。这种器件可用作开关或者放大调制器。另外，图 7b 所示的电极将随着施加电压的作用而引起类似棱镜图形折射率的变化。因此，根据施加到电极上电压大小，导波束能够转向不同的传播方向。

相位匹配的相互作用也可用来提供槽形波导中的电-光调制。例如图 8 阐明两个槽形波导不加电压时原来相位匹配情况。在此情况下，波导 A 能量传输到波导 B 中。在适当的调制电压存在时，相匹配被破坏(或失配)，能量的传输就截止(或减少)。因此这种器件可用作槽形波导的开关或调制品。图 1 已经阐明了这种开关，可以用作单模光纤通信系统中的交换台。

在集成光学中调制器可能是最广泛研究的元件。与普通的光学调制器和偏转器的优

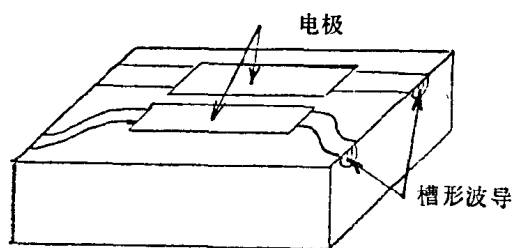


图 8

值相比，所有的集成化电-光调制器和偏转器的一个突出的特点是它们高的优值。这种情况主要由于薄膜波导器件中光能量集中在一个小区内。因此，在建立一个给定电场强度时它所需的电压(即微波调制功率)比普通的器件所需的电压要小得多。对于电光系数大的材料，如 LiNbO_3 ，实验和理论的结果证明可以在集成光学调制器中实现每兆赫调制带宽在微瓦级范围内的微波功率调制。

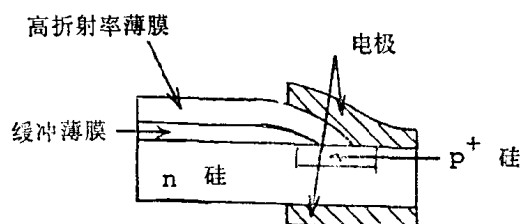


图 9a

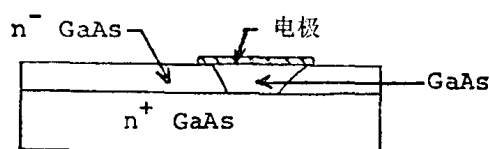


图 9b

光源和探测器

原则上，每当在薄膜波导中有正的反馈(如分布反馈谐振器)，以及每当导波放大使得波导增益超过损耗时，就可获得薄膜激光器的作用。到目前为止，有两种激光器。当若丹明 6G 染料灌入到带有光栅的波导顶部就可以提供分布反馈，使用适当的光泵浦就

可获得染料激光器振荡。分布反馈(DFB)和布拉格反射器光栅也已用于双异质结中以获得薄膜注入激光器。在此情况下,把载流子注入到 $P-N$ 结区域获得增益。稍后将由 Garmire 和 Scifres 两位博士在这次会议上作有关 GaAs-DFB 激光器的更为详细的报告。

分布反馈薄膜激光器的两个最重要的特性是:(a)激光器振荡发生在波导模式中。不论是单片集成还是混合耦合都有可能使用薄膜激光器来实现如图1a所示的集成发射器。(b)分布反馈腔体比一般的法布里-珀罗腔体能维持数量少得多的谐振模数(通常只有1或几个模数)。因此在DFB激光器中很容易获得单模谐振。激光器输出比一般激光器更加相干。而且对于如GaAs注入激光器一类的激光器,振荡波长是用光栅周期而不是用放大过程的峰值来确定的。因此比起普通的注入式激光器,它的发射波长很少受到温度变化的影响。

在普通的光通信中,硅PIN二极管和雪崩二极管已非常有效地作为光探测器。不幸的是硅材料在近红外波长范围内不透光。为了利用硅来获得波导探测器,可以在硅片上面淀积一层低折射率的衬底和高折射率的薄膜作波导。如图9a中所示,当波导衬底做成尖劈在探测器界面同探测器接触,波导中的能量就传输给硅然后被硅探测器吸收。一个更佳的途径是发展单片雪崩肖特基势垒波导探测器,示于图9b中。在此情况下,0.905 μm 激光器辐射的波导是本征GaAs薄膜,同时由于电吸收效应GaAs探测器吸收了辐射,

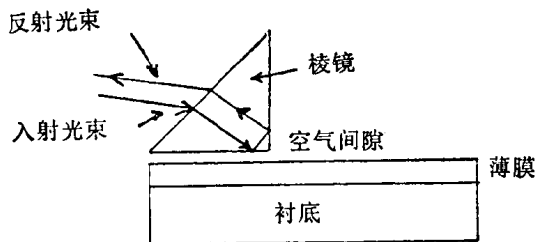


图10

然后光子激发产生的电子-空穴对在高场区倍增以提供电流增益。典型地可预期得到50以上外量子效率和小于 10^{-9} 秒的上升时间。这种单片波导探测器的优点是使用GaAs电光材料。因此开关,解调器等等很容易组合在同一晶片上以实现集成接收机,示于图1b中。

薄膜波导的耦合

如何把外部激光束耦合到均匀的薄膜波导中去已有广泛地研究。常用的两种方法是棱镜耦合法和光栅耦合法。在图10所示的棱镜耦合法中,激光束在棱镜底表面上是全内反射的。入射角调整成沿棱镜底表面的激光束的相速度的分量等于所需导波模式的相速度。当压力作用在棱镜上时,结果波导的消失场和反射激光束在空气间隙中明显地重叠,通过相位匹配的相互作用将发生能量从激光束传输给波导。通常用带锐角的直角棱镜,并且调整棱镜的压力和平移棱镜的位置,结果当最大量的能量被传输到波导时,棱镜的垂直边就切断了相位匹配的相互作用。原则上,对均匀的空气间隙能得到81%的激励效率。用非均匀的空气间隙能得到高于95%的效率。通常在实验装置中能够容易地得到30—40%的效率。

除了光栅周期性可提供相位匹配以外,光栅耦合器有同样作用。通常是用在波导顶部形成一层适当曝光的光致抗蚀剂层的方法制备光栅。另一种方法是利用光致抗蚀剂掩模在波导顶部刻蚀出光栅。掩模是用普通的光刻法或用二束激光的相干或用扫描电子束显微镜根据相位匹配所需的周期性来制作的。通常光栅法在应用上是简单和方便的。它的效率通常是低的(在大多数实验条件下大约是10%),这是由于较高数量级衍射和衬底的辐射损耗所引起的。但是特别小心地消除这些损耗之后也能得到超过80%的耦合

效率。

在这方面应当指出,不管是光栅耦合器还是棱镜耦合器都是用作输出耦合器;如果光栅(或棱镜)足够长,在所有模式中全部能量终将从薄膜波导中耦合出来。不同模式的能量能够以不同的角度耦合出来,并且以不同位置出现在投影屏幕上。这就是所谓的 m 线。槽形波导是这样被激励的:首先激励均匀的波导模式,然后通过带尖劈水平剖面的过渡波导,将能量从均匀薄膜波导模式转换成槽形波导模式。

单模光纤和薄膜波导的耦合

如何将单模光纤有效地耦合到薄膜波导中去是实现任何单模光纤通信系统以前必需解决的问题。最直接的方法是将波导的一端对准光纤的一端,如图 11 中所示,可使能量从一个波导传输到另一个波导中去,就象微波从一个波导传输到另一个波导一样。Bisbec 用这个方法获得了二个多模光纤的有效耦合,在这里两根玻璃光纤是用机械对准之后加热熔接在一起的。Guttmen 用特殊的机械夹具对准两根单模光纤直接耦合也获得了高的耦合效率。但是直接激励需要在机械对准和样品制备两个方面极端准确,以致光纤的一端能够与波导特定的端位相匹配。此外光纤的端点和波导必须有良好的接触。这些要求在光纤同薄膜的耦合中,比在光纤同光纤

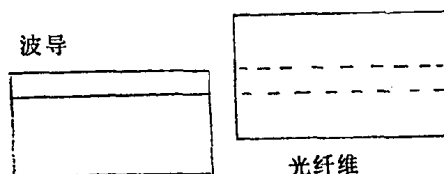


图 11

的耦合中要困难得多。因此所报道的单模光纤同薄膜耦合的激励效率相当低,10%至40%。进一步提高效率取决于改进有关制造技术的能力。

另一种方法是通过消失场的相位匹配的相互作用把光纤耦合到薄膜波导上。已经认识到为了匹配两个相速度,使波导厚度成尖劈形状将逐渐地降低相位速度,直到它最后达到衬底平面波的相速度为止。因此,如果在最初薄膜厚度处,波导模式的相速度是大于光纤的相速度,同时衬底折射率低于光纤的有效折射率,在沿着尖劈的某个地方,在波导与光纤之间的相位匹配将自动产生。这种尖劈速度耦合在玻璃波导和光纤之间,以及在二个玻璃波导之间的有效作用,可获得超过70%耦合效率。但是可望用作有源集成光学元件的大多数波导,如 GaAs 和 LiNbO₃。具有非常高的衬底折射率,这种耦合方法对它们是不适用的。其次,为了获得尖劈速度耦合,目前已制订出不同的研究计划来制造如图 12 中所示的过渡波导。过渡波导的基本原理是把能量从原来的波导传输到具有低衬底折射率的可与光纤尖劈速度耦合的另一个

(下转第 9 页)

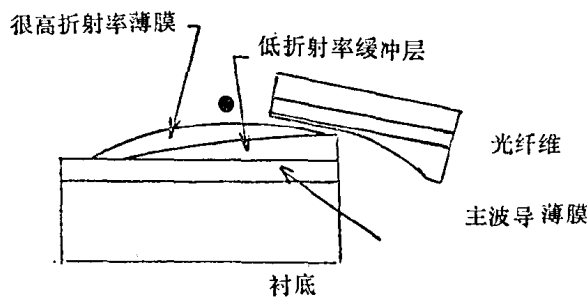


图 12 a

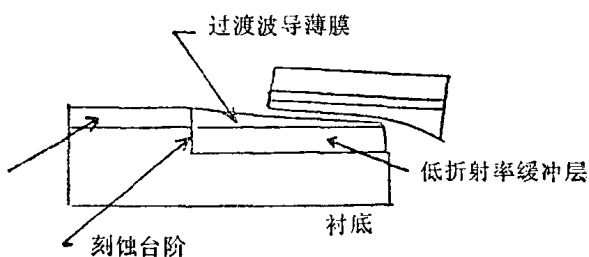


图 12 b

日本集成光学的进展

1. 引言

在集成光学方面,日本的研究活动,由于光通信使用可靠光学元件的迅速发展和预期光电子学于未来日益广泛的应用,看来其发展的步伐将会加快。

本文仅是日本在集成光学方面研究活动的一个缩影。这里由于情报不全,仅仅根据许多参考文献报道的研究活动是有其局限性的。

II. 平面光波导

A. 几何形状和材料

考虑到有源层内外不同的等离子频率,对平面光波导和半导体面结型激光器的最大增益问题已作过研究。对不均匀折射率分布的非对称薄膜介质波导的横向模限制也进行过讨论。为了用介质光波导制作有源器件,有人提出,可调谐参量振荡器。藉助于波导层的模数与色散有关特性完成相匹配。

最近对于介质波导层无序缺陷引起的散射,以及金属包层介质波导模和各向异性与回转性波导模进行过仔细的讨论和研究。测量参数的一种方法是利用两个波导模应用于由高频溅射方法制备的薄膜玻璃波导。

用离子交换和离子迁移方法已经很成功地在玻片上形成波导,通过掩模从玻璃表面扩散钛离子。据报导这些二维多模波导在 $0.63\mu\text{m}$ 波长时损耗小于 0.01dB/cm 。在这些波导之间或者在波导与光纤之间直接连接

获得了小于10%的损耗。通过利用空间变化电场产生离子迁移获得了波导深度表面下的轴向变化。用扩散铅离子来形成玻璃波导,其聚焦特性亦已被证实。对于制作薄膜波导的其他许多材料,例如五氧化钽,高频溅射的染色玻璃薄膜,以及用离子注入方法将钛注入熔融石英可获得低的损耗都进行过讨论。

对于用外延生长法以及用高频溅射法能形成光波导的 LiNbO_3 单晶薄膜,用等离子氧化法制成 $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ 光波导,以及用As-S-Ge玻璃制成波导及有机薄膜波导都已有报道。

用薄膜包层顶部窄的介质条状形成的二维波导叫做“光条状波导”。GaAs薄膜也可用作这种波导。这些结构中弯曲几个毫米曲率可能不会引起高损耗。可用这种技术在体晶体表面上形成二维波导以及用平面金属条盖来形成这种波导。

至于用高频溅射玻璃形成其薄膜的厚度呈抛物线状分布的透镜式薄膜光波导,它的聚焦长度从几毫米到几厘米在颇大程度上取决于横向模,用反溅射方法能控制住厚度的分布,以及对这种波导的一维付里叶变换和一维图象处理都已有人研究过。

B. 测量波导参数

使用电子探针和电子显微镜,通过观察波导的远场散射图,可以测出高频溅射玻璃薄膜中表面不规则性为 $70\text{\AA}$,相干长度为 $1\mu\text{m}$ 。利用两个传输模来测定薄膜厚度和波导折射率,其精确度分别为0.3%和0.1%。用这种方法也可测定波导的各向异性特征。在用扩散离子形成的波导中这些技术也能用

来测定扩散的深度。所测定的常数 D ,在 470°C 时硅和石英玻璃中的 Ag 离子,扩散系数分别为 1×10^{-15} 和 $2 \times 10^{-16} [\text{m}^2/\text{S}]$,以及在相同的温度下石英玻璃中的 Tl 离子为 1×10^{-15} 。

C. 耦合器和滤波器

对于一种多层薄膜波导定向耦合器,及其平面耦合问题,以及从分支介质波导到多层介质波导都已有过研究。

另外,对于用等效电路模型构成光栅耦合器,光致抗蚀剂光栅的耦合效率,以及用薄膜波导尖劈端对光纤进行光学耦合,也都进行过研究。

曾有人通过溅射金属薄膜在玻璃薄膜上形成了 TE₀ 模滤波器。参考文献中对金属条盖波导与模相关的滤波作用已作了详细的阐述。对多层介质波导中的 TE - 模滤波器也作了研究。

对非倒易的集成光路器件作过理论探讨。

III. 有源集成光学

A. 集成化激光器

半导体注入激光器系由镜面,泵浦机构,有源波导,以及调制机构所集成。人们广泛地研究了激光器的寿命和双异质结注入激光器的室温连续工作已经超过了几千小时。某些研究人员已对 GaAs 双异质结激光器的单轴和横向模振荡作过实验和理论分析。人们对于通过光泵浦在可见光频段工作的激光器,以及热效应都进行过研究。关于日本在这个领域的最近进展在参考文献中已作过阐述。

注入激光器与外部电路之间有效连接问题尚未获得全部解决。为了实现单片集成光路,曾对分布反馈激光器作过基础的研究。用在 GaAs 薄层的波纹表面生长一层 AlGaAs 外延层制成了一种带光栅的双异质结结构。初步结果表明这些激光器的电流和电压特性

与普通的双异质结结构是一样的。对于分布反馈染料激光器,以及由定向耦合器和外部电路相连接的环形谐振器组成的激光器都作过实验。

据报道用掺铈玻璃薄膜制成的放大器,在 $1.06\mu\text{m}$ 波长时具有百分之几十的增益。

B. 调制

注入式集成光学激光器通过直接调制泵浦电流可能是有效的。人们已经研究过毫米波区的调制问题。但是最大调制频率有限,因为受到载波寿命的限制。这个作用使 GaAs 激光器调制频率上限被限制在几千兆赫。有人已在一定调制频率上观察到一种共振现象,它可使效率提高和泵浦电流产生光脉冲的正弦调制。有人提出用增益调制激光放大器的方法进行外部调制。对于 PCM 脉码调制使用的 GaAs 双异质结激光器的 200 兆位脉冲调制及其分析模拟,都有人进行过研究。

至于外部调制器,人们已经用 LiNbO_3 薄膜制成了相位调制器。有人提出以定向耦合器的耦合变化作为强度调制机构。由于施加电压在 LiNbO_3 晶体上产生波导作用,在这个晶体表面上以及由于紫外光激发而产生调制现象。由此获得用无定形氧化碲薄膜对 TE 和 TM 模之间的模式转换。

C. 参量波导

有人提出可根据包层折射率变化原理来工作的 GaAs 薄膜可调谐参量振荡器。在 $0.53\mu\text{m}$ 波长时以 70mW 输出功率在覆盖玻璃薄膜的石英中可获得相匹配的二次谐波振荡。从理论上研究了另一种 CuCl 晶体。在相匹配情况下也可获得单向 ZnS 薄膜的二次和三次谐波振荡。

D. 偏转器

对于有效的薄膜声光偏转器,单片集成化 ZnO 薄膜在 130MHz 时可获得 90% 的偏转效率,以及 LiNbO_3 衬底上 As_2S_3 薄膜在 200MHz 调制时可获得类似结果均已见有报道。

IV. 微 光 学

小型、坚固、集成化的普通光学元件的实际应用颇为吸引人。

有人利用聚焦纤维透镜(SELFOC)以避免光束扩散制成用四块光电晶体相串联的小型光调制器。对于 17V 半波电压,以及从直流到 1.6GHz 频带的调制器,利用光纤透镜制成法布里-珀罗式调制器,利用组合一维和二维光纤透镜从双异质结激光器发射一个模

进入光纤等都有人研制过。至于传播波和模变换的基础理论则早已在参考文献中阐述过。

还有人用片状晶体制成小型化光调制器,以 13V 半波电压通过 Ce-O_2 薄膜 $40\mu\text{m}$ 厚包层的 LiTaO_3 单晶获得了 $0.63\mu\text{m}$ 波长的强度调制,以及 GaAs 小片可在 $1.06\mu\text{m}$ 波长调制光波。

译自 IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques vol. MTT-23, No1, pp. 16—20, 1975 李国详译 水海龙校

(上接第 6 页)

波导中去。所有这些过渡波导都可使用溅射淀积,溅射蚀刻、离子铣磨技术制造出来。原则上,使用这种方法能获得 100% 耦合效率。这种耦合方法潜在的困难在于这个事实,即高耦合效率需要非常缓慢的尖劈斜率。在小的过渡波导厚度的情况下,对长的尖劈部份由于表面的不规则性引起的散射损耗可能是非常大的。因此,过渡波导的插入损耗可能过分大,即使耦合效率可能是高的。

到目前为止,初步结果是鼓舞人心的,我们希望能找到把薄膜波导同单模光纤耦合在一起的有效方法。

结 论

集成光学是一个迅速发展中的领域。许多应用如高数据速率电信,连接几个高速数字计算机的数据母线,实时高速信号处理等等,将从这种研究和发展计划中得到好处。但是,对于复杂的集成光学通讯系统的考虑是遥远将来的事情。当前的目标是证示某些简单的系统,如海军的单模光纤数据母线。

译自 SPIE vol. 77(1976) Fibers & Integrated Optics pp. 23—30 陈自姚译 马圣驹校

日本光波导器件最近的研究活动

引言

在光波导器件领域日本的研究活动颇为活跃,因为它有许多可能改进普通的光学器件。最近人们的注意力主要集中在特别是用于光纤通信的光源,调制器以及各种元件或者纤维间的耦合器。

本文将评述日本对这个领域开展的一些最近研究活动。

光纤元件

在光通信方面人们的注意力主要集中于低损耗的硅纤维。用硅或塑料作包层的硅芯纤维,损耗仅几个 dB/km。Kawashima 等人制造了在 0.14 数值孔径时损耗为 3dB/km 的单模纤维。据 Inada 等人报道,在 1.05 μ m 波长时损耗仅有 1dB/km。在研究硅纤维的同时也广泛地研究了组分玻璃纤维, Koizumi 等人把自聚焦纤维的损耗减小到 8dB/km。同时也研究了光缆的基础技术,如张力,泄漏,互耦,以及光缆损耗等效应。

从实用观点来看,光纤的连接和接合是很重要的。Tsuchiya 等人曾报道对偏心连接器进行的详细测量,他们通过在两根光纤之间插入一块塑料薄膜获得了 0.2dB 平均损耗。

人们对通过滤波器增大光纤带宽,对光纤劈光器,分束器,监视器和衰减器以及在两根光纤尖劈端之间耦合证明模的选择透射率进行了研究实验。

无源波导器件

人们对无源波导中横截面的波形限制方法早已作了研究。

在无源器件方面人们主要研究了低电压的高速外部调制器。Noda 等人演示的电光波导振幅调制器是在 8.5 伏电压下通过扩散 TiO₂ 到 LiNbO₃ 表面上制成的。在 Cu 扩散到 LiTaO₃ 情况下达到了 1 GHz 调制速率。根据定向耦合器原理,用 AlGaAs 多层结构制成的调制器也在研究中。

用 ZnO 薄膜制成的声表面波偏转器,在 130MHz 声频时达到了 90% 的偏转效率。与上述结构类似的 TE 和 TM 模转换器达到了 88% 的转换效率。

人们报道了集成在金属条盖玻璃波导上具有很高量子效率的硅探测器。Ito 等人已演示了 ZnS 薄膜的相匹配谐波振荡。

波导光源

AlGaAs 双异质结激光器

在光纤通信系统中人们研究了 AlGaAs 双异质结激光器在室温情况下连续工作,为了实现室温连续工作,已设计出其光波和载流子受到限制的各种条状结构,阈值电流小于 100mA,但可靠性仍是最严重的问题。这种激光器已经做到了几千小时以上连续工作。Inoguchi 在大气条件下已做到了 18000 小时以上非密封的连续工作。据报道,体积为微米级的点光源采用了埋入式异质结激光

器和横向结型条状激光器。这两种激光器的工作电流很低,分别为 9.5mA 和 36mA,它们达到了的寿命:埋入式异质结激光器在 1000 小时以上,横向结型条状激光器在 3000 小时以上。单频工作是横向结型条状激光器一个典型的特点。降低工作电流的另一种方法是设计有源层厚度小于 $0.1\mu\text{m}$ 的分别限制异质结激光器。

一种含 Al 量较高的双异质结激光器可见光源已研制成功。

直接调制

对注入式激光器来说,较典型的是高速调制。谐振现象取决于载流子,光子的寿命,以及限制最大调制频率的偏流。Lang 和 Kobayashi 通过光注入来缩小弛豫效应获得了 400 兆位/秒高速脉冲调制。Ikegami 指出,光纤传输中造成带宽限制的原因是双异质结激光器的频谱扩展振荡。用反向脉冲技术在不加偏压条件下能获得几千兆位/秒的高速脉冲调制。

发光二极管与光纤的耦合

用作光纤传输的发光二极管也已制成。带波导层的发光二极管具有亮度高和寿命长的优点。与光纤组合在一起的发光二极管已

制成,输出功率达到了几百 μW 。同时,为了操作方便,与光纤组合在一起的激光二极管也已制成。

新颖的波导激光器

分布反馈 (DFB) AlGaAs 激光器的频带很窄,小于 0.2A。Nakamura 等人报道了一种有分别限制结构的室温连续工作激光器。

Aoyagi 等人已制成有频率调谐的分布反馈染料激光器。通过改变有源层厚度,可使波长区在 5800 A 至 6400 A 之间。

集成双波导 (ITG) 激光器的导光层邻近于有源层。激光从称为输出波导的导光层发出,因此能与输出波导连接的另一个元件相耦合。有源层镜面由溅射蚀刻方法制成。用这种技术制成的双异质结激光器具有与解理面激光器近似的阈值 $1.8\text{kA}/\text{cm}^2$ 。镜面结构的激光振荡器仅在输出层上观察到有低阈值。化学腐蚀能提供非常平坦的垂直于有源层的平面。光学元件的单片集成将来有可能用这种结构付诸实现。

译自美国 Topical Meeting on Integrated Optics 1976 pp. WD1-1~WD1-4 李国祥译
水海龙校

集成光学中的周期结构

〔摘要〕 本文述及到周期薄膜波导的理论及器件的应用。讨论的专题包括：模式解，光滤波器，分布反馈激光器(DFB)，分布布拉格反射激光器(DBR)，光栅耦合器，以及非线性相互作用中的相匹配。

1. 导 言

周期结构或介质中波传播的现象在许多物理学及工艺的分科中都一再出现。例如，人们研究晶体中的X射线及电子衍射现象；伴随声波作周期性形变的光衍射现象；能带结构，声子谱禁带宽度，晶体中的电子能量等现象。应用这些现象制作的很多实际器件中，我们可以提到行波管，直线粒子加速器，衍射光栅和全息照相等。

目前，随着介质波导及器件加紧的研究，新一代光器件诞生了，这一领域有时被称为“集成光学”，它使用的是周期薄膜介质波导。这一类型的器件有些已经做出，这包括薄膜光滤波器，分布反馈激光器(DFB)，分布布拉格反射激光器(DBR)以及介质波导的输入输出光栅耦合器。

这篇论文力图概述并评论周期薄膜器件的理论及实验的进展，并特别致力于说明重要的统一概念。

II. 波 导 模 式

在开始周期波导器件的分析前，先了解能维持在均匀(非扰动)波导中的基本模式是很重要的。我们把注意力局限在图1所示的那样平面波导上。根据文献介绍，从平面波导推广到沟槽波导是一简单的事情，不过这

要引进相当的数学复杂性，而大部分在性质上并没有对任何基本现象进行修改。

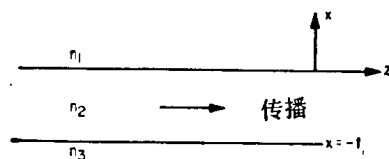


图1 $(\partial/\partial y=0)$ 介质波导

我们必须求解波动方程

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) + k^2 n^2(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}) = 0 \quad (1)$$

式中 $k^2 \cong \omega^2 \mu \epsilon_0 = (2\pi/\lambda)^2$ ， n 是折射率。其解满足在介质界面上的 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$ 的切向分量连续性。在式(1)中场的形式取

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r}) \exp i(\omega t - \beta z) \quad (2)$$

因此它成为

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) E(x, y) + [k^2 n^2(\mathbf{r}) - \beta^2] E(x, y) = 0 \quad (3)$$

在(3)中让 $\partial/\partial y=0$ 并 I, II, III 区分开写，得到：

区 I

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} E(x, y) + (k^2 n_1^2 - \beta^2) E(x, y) = 0 \quad (4a)$$

区 II

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} E(x, y) + (k^2 n_2^2 - \beta^2) E(x, y) = 0 \quad (4b)$$

区 III

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} E(x, y) + (k^2 n_3^2 - \beta^2) E(x, y) = 0 \quad (4c)$$

式中 $E(x, y)$ 是 E 在直角坐标中的分量。在着手正式的解 (4) 之前用简单的论证可以认识到很多解式的物理性质。我们认为其解式是在不变的频率 ω 时的传播常数 β 的函数。并假定 $n_2 > n_3 > n_1$ 。对于 $\beta > kn_2$ 情况 (就是图 2 中的 a 状态) 直接从 (4) 式可以得出在每处 $(1/E)(\partial^2 E/\partial x^2) > 0$ 并且在波导的所有的三层中 (I, II, III) $E(x)$ 皆为指数式的。由于在二个界面上 $E(x)$ 及其导数都要匹配, 所以它的合成场的分布如图 (a) 所示。从图中可以看出, 随着离开波导距离的增加场的增加是没有止境的, 因此这个解式没有“物理的实现性”, 因而不对应于实际的波。

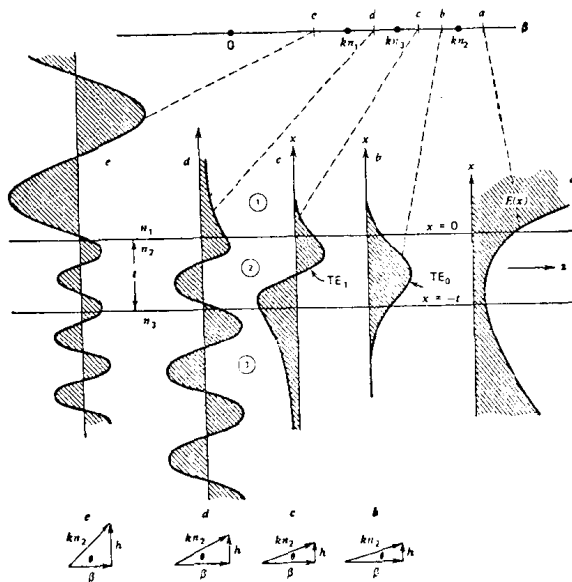


图 2 上面: 图 1 所示的波导的传播常数 β 的不同形态 a, b, c, d, e
中间: 相应于不同 β 值的场分布
底面: 相应于不同传播状态的传播三角形图

对于 $kn_3 < \beta < kn_2$ 情况, 如点 b, c 所示。在区 II 中因为 $(1/E)(\partial^2 E/\partial x^2) < 0$ 所以 (4) 式的解是正弦曲线, 但是在区 I 及 IV 中解式是指数式。这使解 $E(x)$ 可能满足边界条件而同时在区 I 及 III 中为指数衰减。图 2 中的 b, c 即表示这样的二个解。这些模式所携带的能量被局限在波导层 II 的附近, 由此我们把它称为受限模式或导行模式。从以

上讨论可得出导行模式存在的必要条件是 $kn_1, kn_3 < \beta < kn_2$, 因此仅当 $n_2 > n_1, n_3$ 时即内层具有最高的折射率时受限模式是可能的。

当 $kn_1 < \beta < kn_3$, 即相应于图中状态 d 时根据方程 (4) 其模解式对应于区 I 中的指数特性曲线, 及 II, III 区中的正弦曲线, 如图 2d 所示。这种模式称为衬底辐射模式。对于 $0 < \beta < kn_1$ 即 e 所表示的情况, $E(x)$ 的解式在所有三个区中都为正弦曲线。这种模式称为波导的辐射模式。

方程 (4) 的解式在界面上满足边界条件, 其结果表明当在状态 d 及 e 时 β 是连续的变量, 而在传播状态即 $kn_3 < \beta < kn_2$ 时所允许的 β 值是分立的。受限模数取决于宽度 t , 频率 ω , 以及折射率 n_1, n_2, n_3 。在给定的波长下受限模数随 t 的增加而从 0 开始增加。例如, 在某一 t 值时模 TE_1 变成受限模式。进一步增加 t 值 TE_2 也将允许存在。其它依此类推。

一种实用的观点就是把内层 2 中波的传播看作是水平轴成某一 θ 角度传播的平面波, 它在 II—I, II—III 界面受到一连串的全内反射。这个结果是根据方程式 (46) 分析得到的。假定其解式是 $E \propto \sin(hx + \alpha) \exp(-i\beta x)$ 的形式, 那么我们可得到

$$\beta^2 + h^2 = k^2 n_2^2 \quad (5)$$

方程 (5) 表示以 β, h , 及 kn_2 为边的直角三角形, 如图 2 所示。注意到由于频率是恒定的, 对于 b, c, d 及 e 情况说来 $kn_2 = (\omega/c)n_2$ 是相等的。这样, 在形式上就能把波的传播看作为沿斜边方向以恒定的传播常数 kn^2 传播的平面波。随着 β 的减少, θ 一直增加。当 $\beta = kn_3$ 时, 波在 III—II 界面停止全内反射。这是根据这样事实得出的, 因为电磁波导行条件 $\beta > kn_3$ 再应用关系式 $\beta = kn_2 \cos \theta$ 即可得到 $\theta < \cos^{-1}(n_3/n_2) = \theta_c$, 式中 θ_c 是 II—III 层之间界面的全内反射角。因为 $n_3 > n_1$, 所以在 II—III 界面的全反射也就保证了 I—II