

集成光学导论

[美] R. G. 汉斯伯格 著 刘树杞 蔡伯荣 陈 铮 编译

5

内 容 简 介

本书根据美国罗伯特·汉斯伯格教授讲授的《集成光学》电视录相编译而成。共二十讲，系统地论述了集成光学用光波导、耦合器、调制器、激光器和探测器等的工作原理及制作工艺，并概述了集成光学的应用和发展前景。每讲重点阐述物理概念及工程计算，避开复杂的数学推导，论理精辟，内容新颖，简明扼要，深入浅出。每讲还列出了主要参考资料，并附有习题，书末给出了习题答案。

本书可供从事光纤通信、激光技术、光信息处理的科技工作者及大专院校有关专业的教师、研究生、高年级学生参考。

INTEGRATED OPTICS

Robert G. Hunsperger

University of Delaware 1978

*

集 成 光 学 导 论

〔美〕R. G. 汉斯伯格 著

刘树杞 蔡伯荣 陈 铮 编译

责任编辑 马征宇

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张6³/₄ 172千字

1983年6月第一版 1983年6月第一次印刷 印数：0,001—4,500册

统一书号：15034·2471 定价：0.87元

前 言

集成光学是本世纪六十年代末期出现的一门科学技术，它是在微电子学的薄膜工艺、微波理论和激光技术相互结合的基础上形成的。

集成光学的任务在于将传统的大型光学系统微型化，由此带来的优点是显而易见的，如耐震、稳定、经济等。集成光学并不是简单地将组成传统光学系统的各个元器件按比例微缩，而常常要按新的物理观点将这些元器件在结构上作根本的改变，而且希望最终能获得具有多种功能的单片集成光路。显然这个任务是很艰巨的。十多年来已取得不少进展，但整个来说，还仅仅是开始，集成光学仍处于幼年时期。

本书根据美国特拉华大学汉斯伯格 (Hunsperger) 教授讲授的《集成光学》电视录象编译而成，共分二十讲。汉斯伯格教授系统而全面地论述了各个元器件，如光波导、耦合器、调制器、激光器和探测器等的工作原理，又介绍了它们的制作工艺，并概述了集成光学的应用和发展前景，内容新颖，论理精辟，深入浅出，条理分明。每讲列有主要参考文献，并附有习题，书末还给出了答案。

本书适于自学，可供从事激光技术的科技工作者参考，也可供高等院校无线电电子学系和物理专业的研究生及高年级学生学习之用。

本书第一、十九、二十讲由刘树杞编译；第二～七讲，十六～十八讲由陈铮编译；第八～十五讲由蔡伯荣编译。

由于编译者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，希望读者不吝指正。

编译者

一九八一年十月

目 录

第一讲	绪论	1
第二讲	光波导模式	12
第三讲	光波导理论	20
第四讲	波导制备技术 (一)	29
第五讲	波导制备技术 (二)	42
第六讲	散射和吸收损耗	52
第七讲	辐射损耗	62
第八讲	光束耦合器及其原理	71
第九讲	波导耦合器及其原理	85
第十讲	电光调制器	97
第十一讲	声光调制器	108
第十二讲	半导体光发射的基本原理	116
第十三讲	同质结激光器	127
第十四讲	集成异质结激光器	134
第十五讲	分布反馈激光器	146
第十六讲	半导体激光器的调制	155
第十七讲	光电探测器工作原理	166
第十八讲	集成探测器	179
第十九讲	集成光学的应用	191
第二十讲	集成光学的发展动向	200
习题答案		207

第一讲 绪 论

本讲对集成光学领域作一概述，由此读者将知道：

- (1) 集成光学是什么；
- (2) 集成光学与现有电光技术有何区别，它的优点是什么；
- (3) 集成光学的发展历史及现有成就；
- (4) 应用集成光学的未来方向。

集成光学是什么

对于许多人来说，首先遇到的问题是，集成光学是什么。在现代电子系统中，信号的产生、检测与处理通常是由集成电路进行的。这些集成电路形成在半导体晶片上或由晶片材料切割出的小片上，再互相连接形成子系统部件，而各子系统又通过导线或同轴线彼此相连以构成整个电子系统。按照集成光学的观点，对于信号的产生与处理的方式，要作两个基本改变。首先是用光导纤维代替通常的电线或同轴电缆，进而用集成光路取代通常的集成电路。在集成光路中，各光学元件形成在衬底小片上，再由衬底晶片内部或表面上形成的光波导而不是导线互相连接起来。

图 1-1 为一集成光学系统的简单示意图，该系统由两集成光路经光纤相互连接组成。图中左端为一片状发射机，其上有两个分布反馈 (DFB) 型激光器，分别产生波长为 λ_1 与 λ_2 的光，目的在于使信道能有两个光信号的复用。在这个简单的示例中，仅有两个激光器，工作于两个不同的波长。实际上可有许多激光器，分别在不同的波长上振荡，这样以波分复用 (WDM) 的方式，就可同时有许多信号耦合入同一光信道。光一进入数据干线，就通到光纤并传输一段距离，到达右端的片状接收机。在片状接收机

上有两个波长选择式滤波器，将光按波长 λ_1 与 λ_2 分开，并分别引导至合适的探测器。由图可见，在接收机小片上也有两个DFB激光器，用作本振，以便实现外差探测。

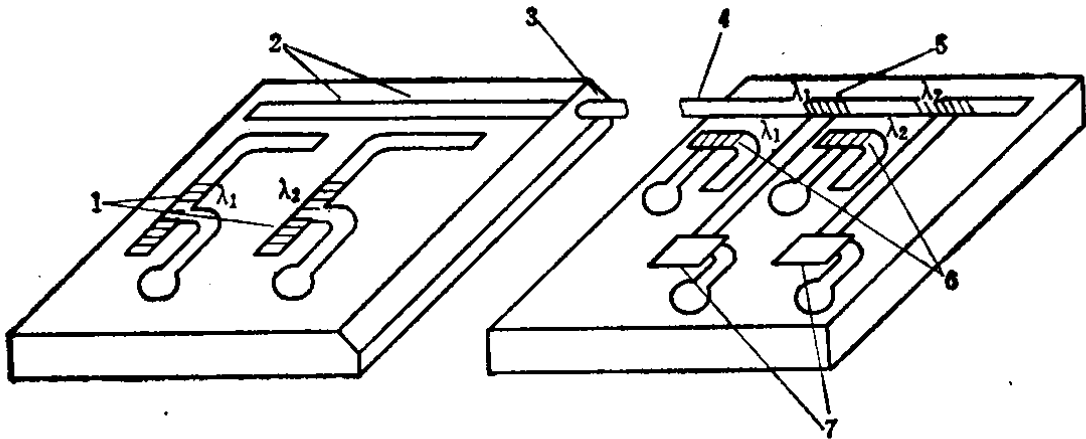


图1-1 单片式集成光学-纤维光学系统

1—分布反馈 (DFB) 型激光器；2—无源定向耦合器；

3—劈形薄膜-光纤耦合器；4—光纤-薄膜耦合器；

5—波长选择式滤波器；6—本振激光器；7—集成探测器。

然而，图 1-1 只是关于集成光学概念的一种简单描述。实际着手制作的集成光路绝不是这样，而且，还需经过长期的实验室研究，才能真正实现。

为了理解研制集成光路的任务，让我们先考察一下一般的光学系统。在普通的光学系统中，有激光光源、分束器、调制器与光探测器等，这些元器件都经精心对准，置于防震台上。防震台重约几千公斤，悬置于空气垫上以阻尼掉任何可能的震动。这是一个长达两米的相当庞大的系统。为了使震动减小到足以保持系统处于对准状态，这样庞大而非常稳定的装置是十分必要的。在集成光学中，人们希望将包含所有这些元件的光学系统微缩，一直到适合在一块半导体晶片上进行单片制造。为此，就必须将这些光学部件的尺寸缩小到微米的数量级，同时必须相应地改变它们的物理结构，以适于在半导体单片上加工。

集成光学的优点

以上说明了集成光学系统是什么。随之而来的第二个问题是，人们为何要研究集成光学，或者说集成光学有何优点。概而言之，采用集成光学系统的优点可分为两类：其一与用光导纤维代替电线或同轴电缆有关，其二则与用集成光路代替集成电路有关。

采用光纤连接可带来如下的优点：

- (1) 抗电磁干扰；
- (2) 不存在电的短路或接地问题；
- (3) 在易燃区安全；
- (4) 传输损耗小；
- (5) 保密性好，难于窃听；
- (6) 尺寸小，重量轻；
- (7) 价廉，原材料丰富；
- (8) 带宽很宽。

首先，光纤能抗电磁干扰，这是因为在介质纤维中传播的光信号不会与在其附近出现的电信号相互作用。在彼此邻近的两根光纤之间也不会有耦合。其次，光纤也没有电的短路或接地问题，因为在光纤中没有电流流动。基于同样的理由，在易于燃烧的地点采用光纤是十分安全的，因为光纤不会象电线或同轴电缆那样有可能产生火花。

传输损耗很小是采用光纤的最重要的优点。在图 1-2 中将光纤的损耗与常用低频双绞线电缆的损耗作了对比。由图可见，光纤的损耗大约是 5dB/km ，而且不随频率而变。在实验室中已制出损耗低于 1dB/km 的光纤，但可提供使用的数量有限，且极其昂贵。至于损耗为 5dB/km 的光纤则已有长度以公里计的商品。由图还可看出，在 $10\sim 100\text{kHz}$ 频率范围内，双绞线电缆的损耗开始迅速增加。当频率更高时，两者的差别更为明显。因此在高频下，人们不得不放弃双绞线电缆，改用同轴电缆。

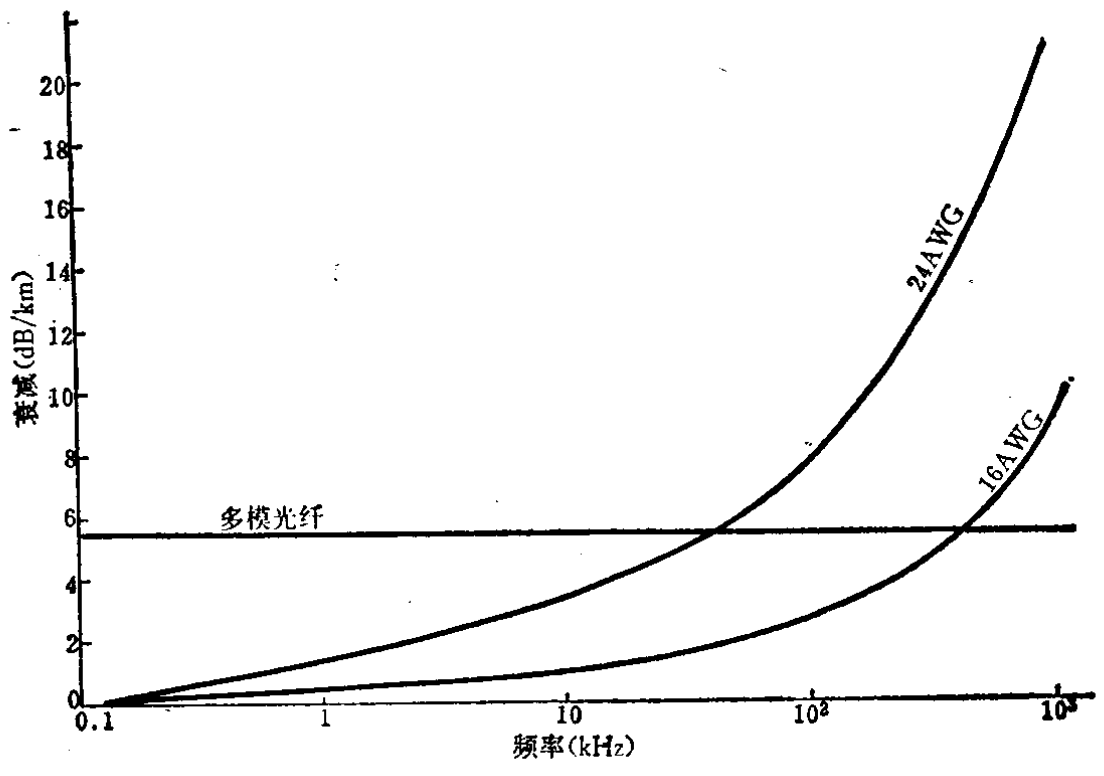


图1-2 光纤和双绞线电缆损耗的比较

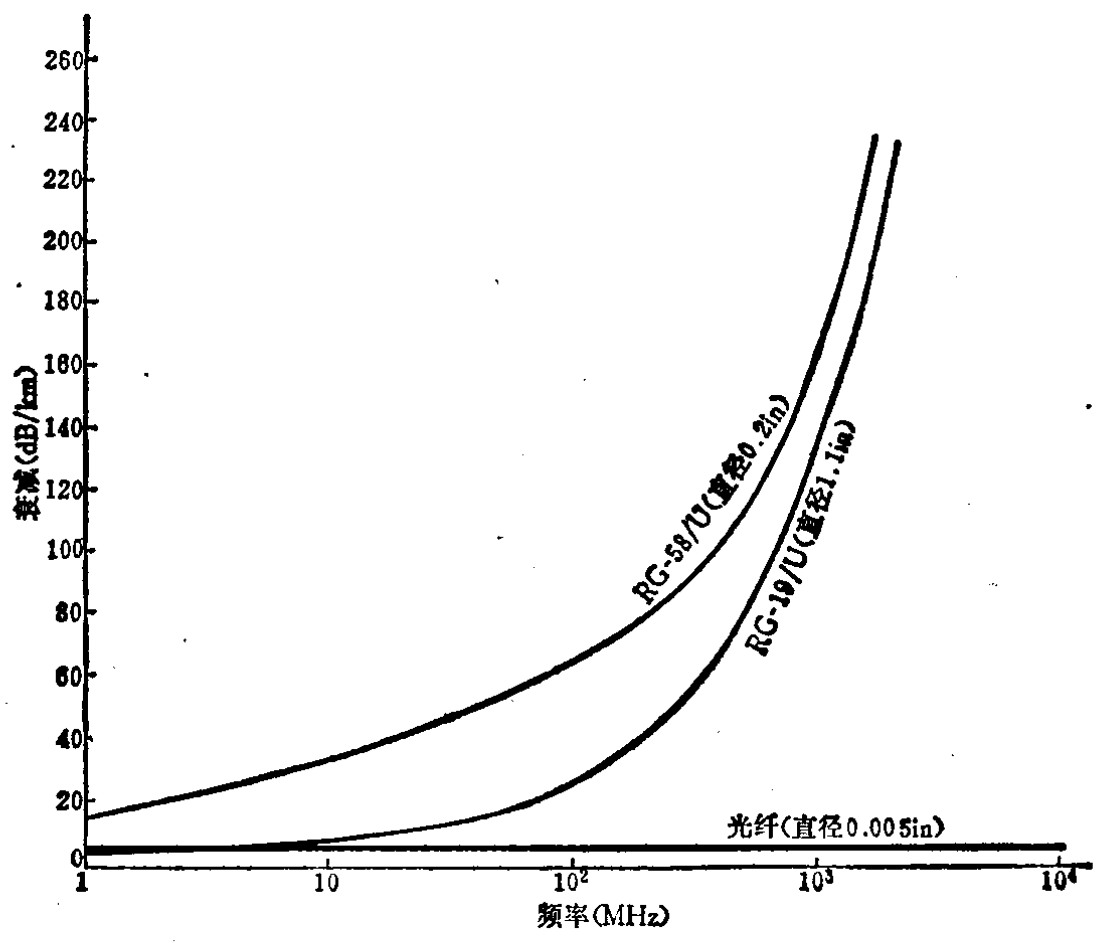


图1-3 光纤与同轴电缆损耗的比较

图 1-3 比较了光纤的损耗与标准同轴电缆 RG-58/U 及 RG-19/U 的损耗。由图可见, 频率从 1MHz 增到 1GHz 时, 光纤的损耗保持不变, 约为 5dB/km。但是, 同轴电缆的损耗则迅速增加, 特别是 100MHz 以上时尤为突出。由此可见, 光纤的主要优点之一, 就是和通常采用导电体传输信号相比, 其传输损耗小。

光纤的另一优点是保密性好, 极难窃听。要想如同获得电信号那样, 将一线圈置于光纤附近, 利用变压器效应从光纤中耦合出信号是不可能的。这一点在军事应用上是很吸引人的。

尺寸小和重量轻也是光纤的突出优点, 特别是对于航空应用尤为明显。目前飞机上所用铜线的重量十分可观。如用光纤代替铜线, 将使飞行费用大为降低。

另外, 制造光导纤维所用的玻璃, 是一种价廉而丰富的材料, 而生产电线所用的铜则是日益稀缺的材料, 其成本不断增加。

光纤连接的最后一个但决非不重要的优点是, 它具有很宽的带宽。表 1-1 给出了这方面的一个明显例子。表中将光纤与 RG-17/U 同轴电缆作了对比。取两者的长度同为 1km, 并设在此长度上最大损耗为 5dB。在这样的条件下, 计算表明, 通过同轴电缆 RG-17/U 能传输的最大带宽为 50MHz, 而通过光纤能传输的最大带宽则是 10GHz。当然, 这个带宽不会用来传输带宽很宽的单个信号。使用这个巨大带宽的合理途径是复用方案, 如前面图 1-1 所示, 将带宽分配在许多信号上, 每个信号只利用整个带宽中很小的一部分。这样, 整个带宽就可用来同时传输许多信号。除

表 1-1 光纤与 RG-17/U 同轴电缆的比较

参 数	RG-17/U 同轴电缆	光 纤
长度	1 km	1 km
直径	2.21cm	0.0127cm
损耗	5dB	5dB
带宽	50MHz	10GHz

复用的可能性外，考虑到光纤很细，因此使用光纤就更为有利。光纤的直径只有 0.0127cm，而 RG-17/U 同轴电缆的直径则为 2.21cm。这样，采用光纤代替同轴电缆可使带宽增加约 200 倍，与此同时又使尺寸缩小到约 1/174。这就意味着，经过相同横截面的传输通路，利用光纤可以传输的信号数目粗略地将为用同轴线时的 10^4 倍。

下面再来介绍与用集成光路代替集成电路相关联的优点，计有：带宽增加；波分复用；多路开关；耦合损耗低；尺寸小、重量轻、功耗小；批量制造的经济性好；可靠性高，等等。

增加带宽仍是主要优点之一。光纤已开始用于信号的传输，为了充分发挥光纤的带宽很宽的优点，集成光路确实是必需的。目前常用集成电路的带宽大致是 100MHz，利用微波技术可以提高到约 1GHz。但是，实际上一个集成电路在 1GHz 频率下很难工作。然而集成光路在高达 10GHz 的频率下工作起来也很方便，同时按照目前的计算，即使频率更高些也是可以的。当然，为了很好地利用这个增宽的带宽，要求采用上述的波分复用技术。

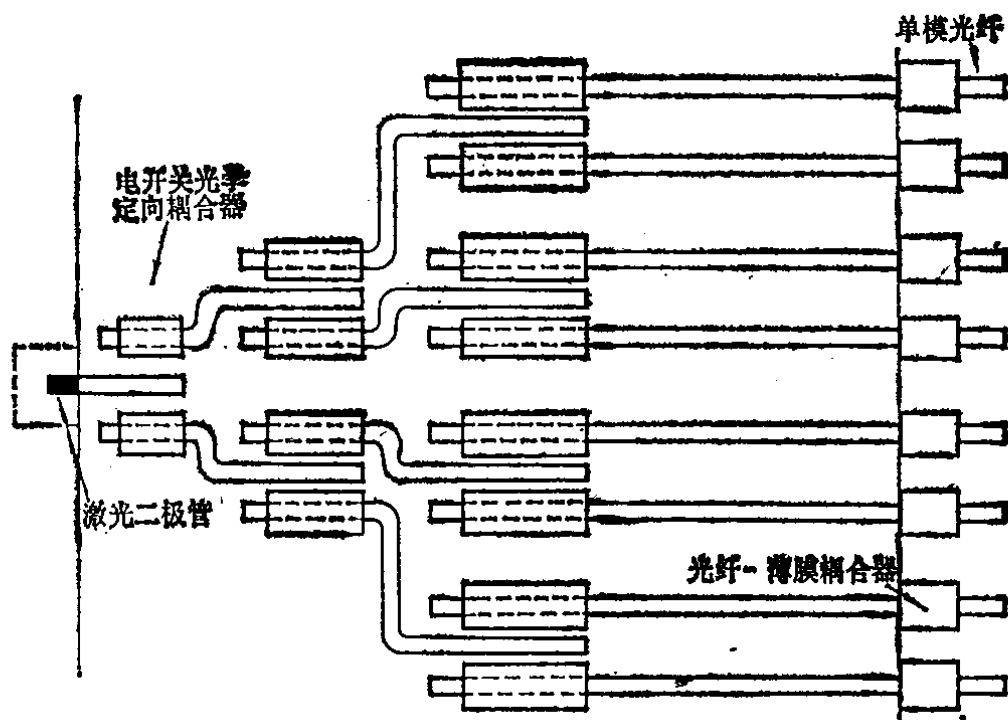


图1-4 具有电光开关的集成光路树型定向耦合器

利用集成加工技术还可以获得光多路开关，增加开关路数与提高开关速度。图 1-4 给出了这方面的一个特殊示例。图中的集成光路树型定向耦合器具有电光开关。从 GaAs 或其他类型的半导体激光器发出的光，由端面耦合到集成光路片上的波导中，然后经电光开关耦合到片上的另一波导，最后通到输出的光纤。要想在光具架上利用大块元件做出这样的光开关，所占空间很大，极难对准。在集成光学的方案中，利用标准的光刻技术；所有这些元件可以容易地在几毫米尺寸的衬底小片上形成。实验表明，这种双波导定向耦合器具有很高的耦合效率，几乎可达100%，同时电光开关速度也很高。

由上述可见，集成光路的优点之一是可以制作损耗低的耦合器，这不难通过采用标准的半导体单片加工技术来实现。

集成光路也具有集成电路的某些优点，如尺寸小，重量轻，功耗小，批量生产的经济性好与可靠性高等。

必须注意，所有这些优点是一个耐震的集成光学系统所具有的，而普通光学平台上的各个光学元件对于震动是十分敏感的，容易失效。在小片上形成的集成光路，由于各个元件互相靠紧，对于震动毫不敏感。

集成光学的发展简史及现状

现在转而略述集成光学的历史。如果不追溯得太远，那末可以说集成光学的初始研究工作是在1968年进行的，因为在这以前，甚至还没有出现过“集成光学”这个术语。贝尔实验室是这个领域中最早的开拓者之一。其他一些地方也做了许多集成光学实验，如休斯实验室，罗克韦尔公司，国际商业机械公司，汤姆逊无线电公司，以及一些大学（如加州理工学院，华盛顿大学等）的实验室。

由美国光学学会主办的集成光学会议，自1972年起，每两年召开一次。其中第一届与第二届会议分别在内华达州拉斯维加斯

与路易斯安那州新奥尔良举行，而第三届与第四届则都是在犹他州盐湖城举行的。各次会议出席人数均不到 200 人。

集成光学方面的主要期刊有：

(1) Jour. Optical Society of America;

(2) Applied Optics;

(3) Jour. Applied Physics;

(4) Applied Physics Letters;

(5) IEEE. Jour. Quantum Electronics.

其他期刊上虽也可能有这方面的文献，但是上列期刊可能是登载集成光学最多的。当然还应参阅历届集成光学会议的论文集。

这些年来，集成光路的研制是沿着两种途径进行的，即混合式途径和单片式途径。究竟选择何种途径，取决于采用什么材料做衬底。有两类衬底材料：一类是不能发光的无源材料；另一类是能产生光的有源材料，见表1-2。

表1-2 集成光路用衬底材料

无 源 材 料	有 源 材 料
石英	GaAs
铌酸锂	GaAlAs
钽酸锂	GaAsP
五氧化二钽	GaInAs
五氧化二铌	其他 III-V 族和 II-VI 族垂直带隙半导体
硅	

在无源材料中，有石英、铌酸锂、钽酸锂、硅等。这里不是按通常的概念来划分是否无源材料的。例如，虽然可以用硅制成二极管和三极管，但是由于硅具有非垂直带隙，所以产生光的效率非常低，因而不用它来制作激光器。基于这个理由，我们称硅为无源材料。采用无源材料做集成光路衬底时，必须选取混合式途径。这时必须从外部将激光束耦合到集成光路中。有关的各种耦合方法以后再作讨论。

在单片式途径中，采用能产生光的有源材料做衬底。发光二极管或激光器就形成在衬底晶片上，用作集成光路的光源。属于这类材料的有各种Ⅲ-V族与Ⅲ-VI族半导体，见表1-2。其突出特点是半导体的竖直带隙，因而具有很高的产生光的效率。在列举的半导体材料中，对于制作单片集成光路来说，应用最广的是GaAs或GaAlAs以及两者的组合体系。关于这一点可以列举许多理由，见表1-3。

表1-3 集成光路中应用的GaAs与GaAlAs的性质

透明波长	0.6~12 μ m (与Al含量有关)
发光波长	0.65~0.91 μ m (与Al含量有关)
晶格匹配	晶格失配甚微，引起的应力很小
开关作用	电光与声光品质因数都大 $n^3 r_{41} \approx 6 \times 10^{-11} \text{m/V}$ $M_2 = (n^6 p^2) / (\rho v_a^3) \approx 10^{-13} \text{s}^3/\text{kg}$
制造工艺	外延、掺杂、欧姆接触、掩模及蚀刻工艺均较成熟
成本	低于其他Ⅲ-V族材料

首先，随Al含量的变化，可以使GaAlAs在0.6~12 μ m波长范围内是透明的，这个范围包括可见光的相当大一部分直到红外波段，是很有用的。

其次，通过改变GaAlAs中的含Al量，可使发光波长在0.65~0.91 μ m之间变化。

另一优点是在含有不同Al浓度的各层GaAlAs之间没有什么晶格失配。这一点十分重要，因为集成光学所用的薄膜结构，是由多层GaAlAs彼此重叠制成的，其中每一层含有不同的Al浓度。这样做的目的在于有时希望改变折射率，而在另一些情况

下则希望改变光的发射波长。这两个目的都可以通过改变含 Al 浓度来实现。在 GaAs-GaAlAs 体系薄层生长过程中，不会使晶格产生很大的畸变，因为 GaAs 与 GaAlAs 两者的晶格常数相差仅 $0.01 \text{ \AA}$ 。这样小的畸变甚至不能用标准的 X 光技术测量出来。其他的体系，如 GaAs-GaAsP 或 InAs-GaInAs 等，晶格常数有相当大的失配，这将在器件各层之间的界面层中引起应力。

再者，GaAs 与 GaAlAs 对于制作光开关是很有用的，因为它们具有很大的电光与声光品质因数。还应指出，与任何其他半导体材料相比，GaAs 与 GaAlAs 的制造工艺（如外延生长、掺杂、欧姆接触、掩模与蚀刻等）已得到满意的发展。

由于以上理由，大量的工作集中于 GaAs 与 GaAlAs 体系，并由此研制出许多集成光学器件。如波导、光源、探测器、耦合器、开关、调制器、滤波器、放大器、偏振器、透镜等，都已制作成功，既有分立的形式，也有与波导集成在一起的形式。必须指出，这里所说的分立器件，其含意和通常光具架上的大型分立部件是根本不同的。这些分立器件是在晶片上制作的，其微小的尺寸与结构适用于集成光路。

总之，集成光路的现状是：集成光学中使用的许多器件已经研制出来，它们都与波导单片集成在一起，目前已有一些包含两个或三个元件的集成光路。但是，能完成复杂功能的大规模集成光路可能还要经过若干年的实验室研究才能制作出来。

习 题 一

1. 在一具有电光开关的 1×64 树型集成光路定向耦合器（即 1 输入端，64 输出端）中，为了开关信号，需要用多少控制金属板？
2. 试确定 1 GHz 信号在 10 km 长度上经下列几种媒介传输时的衰减，
 - (1) RG58U 同轴电缆；
 - (2) RG19U 同轴电缆；
 - (3) 5 dB/km 多模光纤波导。

参 考 资 料

- [1] T. Tamir, "Integrated Optics"●(1975), pp. V. VI, 1-12.
- [2] S. D. Personick, Fiber Optics Communication—A Technology Coming of Age, IEEE Communications Society Magazine, March 1978, p. 12.
- [3] P. K. Tien, Light Waves in Thin Films and Integrated Optics, Applied Optics, 10, 12(1971).
- [4] V. Evtuhov and A. Yariv, GaAs and GaAlAs Devices for Integrated Optics, IEEE Transactions on Microwaves Theory and Techniques, MTT-23, 44(1975).

● 此书为本课程的必读教材，以后各讲将经常引用。

第二讲 光波导模式

本讲介绍光波导中导波模式的概念，你应当学到：

- (1) 什么是导波模式；
- (2) 在平板波导中导波模式是什么样子；
- (3) 导波的截止条件与波导结构参量的关系；
- (4) 观测导波模式的实验技术；
- (5) 描述波传输的波动方程基础。

在集成光路中，把各个分立元件连结起来的关键元件就是光波导。研究光波在波导中的传输特性显然是集成光学的理论基础之一，在集成光学中称之为“导波光学”。在这讲和下一讲，我们仅讨论非金属包层的介质波导，从而导出工程计算中的一些数学表示式。

导波模式的概念

图 2-1 表示波导的基本结构。波导区材料的折射率为 n_2 ，上面和下面的材料的折射率分别为 n_1 和 n_3 。折射率 n_2 大于 n_1 和 n_3 是形成波导结构的必要条件。这样，光束才能在介质 1-2 和 2-3 的界面处发生全反射。通过在上、下界面的全反射，光被约束在波导区中沿 Z 方向传输，而在上、下界面间形成了驻波。这时，如果取 Z 为一定值，观测波导层中 X 方向的光强分布，会发现存在极大值。这与光波在无边界的空间中传输的特性迥然不同。驻波场在 X 方向的分布情况与一定的导波模式对应，有一个极大值的称为基模(或零阶模)；有两个极大值的称为一阶模；……当入射光波电场与入射面垂直时，在波导中传输的波称为横电波(TE波)；当电场与入射面平行时，在波导中传输的波称之为横磁波

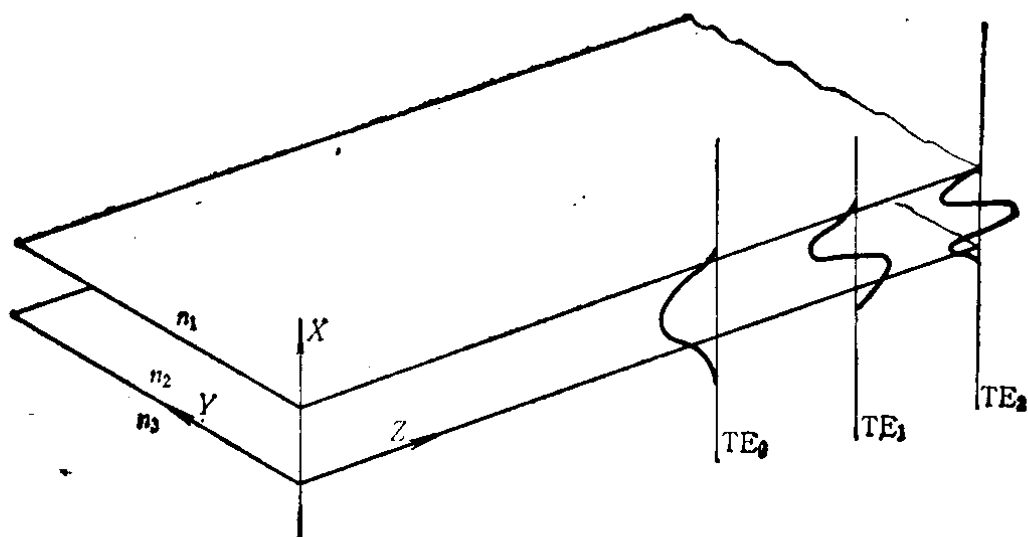


图2-1 平板波导示意图

(TM波)。在图 2-1 中示意性地给出了基模、一阶模以及二阶模的场强分布。

波导层材料的折射率大于周围材料的折射率是构成波导的必要条件，但并不是满足了这一条件就可以传输光波。在波导中能传输何种模式的导波，或者说能建立起什么样的场结构，是由波导结构的参数和光波波长所决定的。对于 n_2 和 n_3 均远大于 n_1 的强非对称波导，能传输 M 阶模的条件是，折射率差 Δn 必需满足

$$\Delta n = n_2 - n_3 \geq \frac{(2M + 1)}{32n_2} \cdot \left(\frac{\lambda_0}{t} \right)^2 \quad (M = 0, 1, 2, \dots)$$

式中， λ_0 为自由空间中的光波波长； t 为波导层厚度； M 为模阶数，等于 0, 1, 2, ... 等正整数，相应的导波模式分别称为基模，一阶模，二阶模……上式的推导过程将在第三讲中给出。

模式观测技术

为了加深对导波模式问题的了解，可看一下实验结果。图2-2表示测量出的光功率密度沿波导断面的分布情况。纵轴表示光功率密度，横轴表示平板波导中的 X 坐标。图中同时也标出了波导与空气以及波导与衬底界面的位置。注意，在本图中是光功率密度分布，而图 2-1 中示意性绘的是电场强度分布。功率与场强平