

集成光学 和光学波导中 新的波现象

[美] 田炳耕著 裘小农译 郭长志校

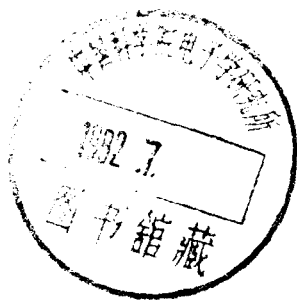
JICHENGGUANGXUE
HE GUANGXUE
BODAO ZHONGXINDEBO
XIANXIANG



42.777
169

集成光学和光学波导中 新的波现象

【美】 田 炳 耕 著
 裘 小 农 译
 郭 长 志 校



人民邮电出版社

1110070

*Integrated optics and new
wave phenomena in
optical waveguides*
P.K.Tien
Reviews of Modern physics
*A quarterly journal published by
the American Institute of Physics
for The American Physical Society*
1 9 7 7

内 容 提 要

本文综述集成光路的目前水平并探讨光路中新的波现象。具体内容有：光波耦合器和 m 线光谱；光在薄膜中的折射和反射；均匀波导、渐变波导和金属包层波导中的简正模式；劈形薄膜中的光学现象；刻纹波导理论以及各种薄膜光器件的物理过程和形成光路的方法。

集成光学和光学波导中新的波现象

[美] 田炳耕 著
裘小农 译
郭长志 校

人民邮电出版社出版
北京东长安街27号
河北省邮电印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售

开本：787×1092 1/32 1981年10月第 一 版
印张：5 28/32页数：94 1981年10月河北第一次印刷
字数：133 千字 印数：1—3,900 册

统一书号：15045·总2514—有5218

定价：0.62 元



译者的话

本书作者田炳耕博士是美国科学院院士、贝尔研究室电子部主任，他从事集成光学研究多年，是这门学科的创始人之一，在国际上享有较高的声望。他的这篇1977年发表的著作，比较全面地论述了集成光学各方面的包括他自己工作在内的研究成果和发展趋向，附有许多图表和比较完备的文献目录，是一篇较有价值的总结性的文章。我们相信其中译本的出版对我国集成光学和光通信的发展将有较好的促进作用。

在翻译过程中，田先生为中译本写了序言，作了一些补充和热情的建议，又承北京大学物理系固体能谱研究室郭长志同志对译稿进行审改定稿。在此谨致谢意。

邮电部武汉邮电科学研究所 裘小农

1980年7月

作者为中译本作的序（译文）

本文是导引性的，其重点是波导理论的基本概念和集成光学的方法，并强调现代的科学如材料科学和工艺技术的协同努力是不可能进行的。应用物理学和其它科学一样，重要的是对物理现象做透彻的理解，以便能够根据这些理解，得出问题的结论。只有达到这样的认识水平，才能运用自如并有所创造。

本文是几年前写成的。而工艺技术在近几年已有了迅速的发展。例如：现在已可以采用远紫外光刻或 x -射线光刻来在用电子束曝光系统(EBES)作掩膜的衬底上印制亚微米的设计图样。反应离子腐蚀已成为硅和Ⅲ-V族化合物的一种重要工艺技术。最近由掺入 Ti 的 $LiNbO_3$ 制成的方向耦合器开关长达 $750\mu m$ ，速率达 $5GHz$ 。更重要的是，由于光通信系统在 1.3 和 $1.5\mu m$ 波长范围的迅速发展，使单片集成光学的重点已从 $GaAs$ 工艺技术转移到与 InP 晶格匹配的 $InGaAsP$ 四元系。此外，与 InP 晶格匹配的 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 是电子元件的优异材料，其迁移率是 $GaAs$ 的两倍，是 Si 的七倍。因此，下一代集成光学的研究将是把 $InGaAsP$ 光学器件与 $InGaAs$ 电子元件相结合的光电子集成。事实上，在最近的将来，在一小片 InP 上集成的包括有光学器件和电子器件的完整光接收器即可问世。

集成光学、大规模电子集成电路、磁泡器件，表面声波以及各种类型的记忆和显示器件形成的相互联系的研究领域叫微工艺技术(*microfabrication*)。在这些领域中，最大的重点

仍应放在形成计算机工业基础的硅工艺技术。我希望中国的工业界和研究所网能够把力量组织起来，形成若干微工艺技术的中心，来自各参加单位的科学家可在其中进行研究工作。这样做，可以使研究计划能根据工业的需要来制订，同时所有工业能共同享用其最新的研究成果。电子束曝光系统、光刻、离子注入、低压化学气相沉积(CVD)、等离子和反应离子腐蚀、电子显微镜、扫描俄歇和二次离子质谱仪(SIMS)和各种外延方法所需的设备，总共估计约需5亿美元。每一中心应可容纳150名科学和工艺技术的科学家和200名电路设计和软件的科学家。目前，中国可以不参加到非常大规模集成(VLSI)的竞赛中去，但应能够生产16K随机存取存储器(RAM)和微处理机等大规模集成电路。

我愿借此机会向中华人民共和国邮电部在1974、1978和1979年给我机会访问了中国的工业和大学表示感谢。对裘小农先生翻译本文也谨表谢意。

田炳耕于美国

1980.6.1

摘要：研究集成光学有两个目的。一是应用薄膜工艺制造光器件与光路。另一是在一小块衬底上集成大量光学元件制造类似微电子学集成电路那样的光路。研究结果产生了微型光波导形式的新型光器件，包括激光器、调制器、开关、探测器、棱镜、透镜和偏振器。其中，有许多比其同类型器件效率高。简单的集成光路已经制成。从半导体工艺的迅速发展，可以看出不难用与GaAs有关的化合物研制成单片集成光路。本书综述集成光路的目前水平并探讨光路中新的波现象。要讨论的具体课题有：光波耦合器和 m -线光谱学，光在薄膜中的折射和反射，均匀波导、渐变波导和金属包层波导中的简正模式，劈形薄膜中的光学现象，刻纹波导理论，以及更重要的各种薄膜光器件的物理过程和形成光路的方法。

目 录

摘 要

I、引言和发展史	(1)
A、发展史	(1)
B、集成光学研究	(9)
II、波导和耦合器中的光学	(12)
A、波导和折射率定则	(12)
B、波导模式和辐射模式	(16)
C、射线光学和曲折波	(21)
D、棱镜耦合器和 m -线光谱学	(29)
E、光栅耦合器和刻纹波导	(34)
F、均匀波导和梯度波导	(37)
G、波导的势阱模型和 WKB 方法	(40)
III、劈形薄膜波导和薄膜棱镜、透镜以及光路构成的研究	(45)
A、劈形薄膜波导和劈形过渡	(45)
B、二维光学和古斯—汉森平移	(48)
C、二层结构，光路中的光导引连接以及合成波导的势阱模型	(53)
D、薄膜棱镜、透镜和其他无源光学元件	(58)
E、方向耦合器和分路波导	(60)
F、劈形薄膜光波耦合器和波导的截止特性	(65)
G、金属包层波导和隔离高折射率衬底的方法	(70)

IV. 周期性波导, 单块集成光路以及薄膜激光器、调制器和开关的研究	(75)
A、光波导中的周期性结构.....	(75)
B、布喇格反射激光器和分布反馈激光器	(86)
C、 <i>Al-Ga-AsDFB</i> 和 <i>BR</i> 激光二极管	(96)
D、薄膜光调制器、开关和光束偏转器	(102)
E、(<i>Al,Ga</i>) <i>As</i> 工艺技术和单块集成光路	(112)
V、结论和意见	(129)
致谢的话.....	(132)
参考文献.....	(133)

I、引言和发展史

A、发展史

几百年来，光学系统的基本设计方法没有什么改变；这些系统是由需要作精密对准、防振、防潮和防止温度漂移的粗大笨重的元件组成。在努力使它们与现代技术相适应的过程中，七十年代初出现了集成光学(*Tien et al.*, 1969; *Miller*, 1969; *Tien*, 1971, 1974; *Miller, Marcatili and Li*, 1973; *Taylor and Yariv*, 1974; *Chang et al.*, 1974; *Kogelnik*, 1975; *Suematsu*, 1975; *Blum*, 1975; *Conwell*, 1976)。那时，由于低损耗光纤的出现，把光通信系统的尺寸大为减小(*Kapron et al.* 1970; *Keck et al.*, 1973)。从而引起人们对小型光系统的兴趣突然高涨。人们开始用正在探索的一系列新的想法进行集成光学的研究。第一个想法是应用薄膜技术制造光器件和光路。由于薄膜技术已在电子工业中普遍应用，所以这个想法是有吸引力的。已经发现，比周围物质折射率大的一层介质薄膜是一个理想的光波导。第二个想法是采用上述波导作各种光元件(包括激光器，调制器，探测器，检波器，棱镜，透镜，偏振器和耦合器)的基本结构。这样，光波从一个光学元件到另一个光学元件的传输就变成两个波导的相互联系的问题。应用在薄膜中传播光导波代替空间中传播高斯光束的结果，使集成光学更接近于微波技术。第三个想法很自然地就是在一片共用衬底上沉积许多薄膜光元件以构成一个完整的集成光路。由于

所有元件都牢固地固定在同一衬底上，振动和对准的问题就减小了。此外，中规模甚至大规模光集成系统的前景肯定是大有希望的。

所以，导波光学和薄膜技术是集成光学的两个基本组成部分。开始的想法只是简单地将微电子技术推广应用于组成光路。但是，光波长比超高频无线电波长短 10^8 倍，所以很快就认识到形成光路必须采用新材料、新做法。幸好，发明了光波耦合器(Tien et al., 1969, 1970, 1975; Harris and Shubert, 1969, 1971; Ulrich, 1970, 1971, 1973; Harris et al., 1970, 1971; Midwinter, 1970; Iogansen, 1962; Dakss et al. 1970; Kogelnik and Sosonowski, 1970; Hope, 1972; Dalgoutte, 1973; Tien and Martin, 1971); 用这种耦合器能把激光光束有效地耦合到薄膜中去，从而可以研究波导模式和试验新的光学材料。开始，甚至在薄膜中做出简单的光波传播实验也是不容易的。由于薄膜表面粗糙，光波在薄膜中传播不了很远就完全散射掉了。我们记得当第一次实验采用溅射ZnO薄膜作的光波导时(Tien et al., 1969)，它的损耗大于 60 dB/cm 。我们在薄膜中只能观察到小于 1 mm 长的光路。不久，出现了用玻璃做的波导(Goell and Standley, 1969, 1970; Goell et al., 1970)和聚合有机硅薄膜波导(Tien et al., 1972)，损耗小于 1 dB/cm (图1)。在过去6年中，曾用不同方法，在不同材料上，制成一些波导(Tien and Ballman, 1975)，这些方法是反应溅射(Tien et al., 1969; Hensler et al., 1971; Gia Russo and Kumar, 1973; Takada et al., 1974; Westwood and Ingrey, 1975; Quinn et al., 1975; Shuskus et al., 1974)，真空蒸发(Tien, 1971)，离子注入(Wei et al., 1973, 1975; Barnoski et al., 1974)，质子轰击(Schneier

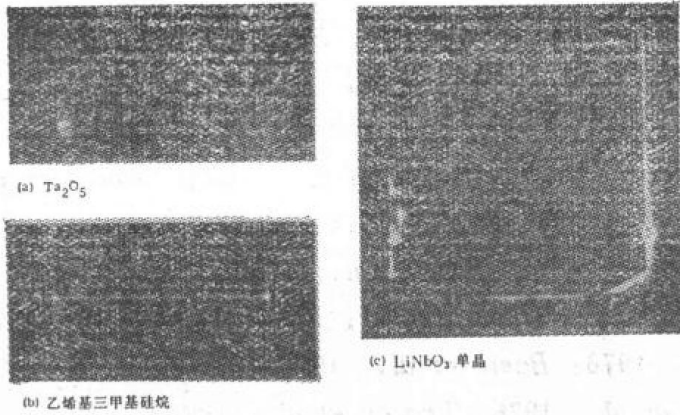


图 1 照片 (a)、(b) 和 (c) 分别表示在 Ta_2O_5 、乙烯基三甲基硅烷 (Vinyltrimethylsilane) 和 $LiNbO_3$ 单晶薄膜波导中观察到的光波传播情况。上述波导损耗分别为 1、0.1 和 1 dB/cm。

et al., 1968; *Standley et al.*, 1972; *Garmire et al.*, 1972; *Barnoski et al.*, 1973; *Somekn et al.*, 1973; *Stoll et al.*, 1973), 离子迁移 (Ion migration) (*Izawa and Nakagome*, 1972; *Shah*, 1975), 溶液沉积 (Solution deposition) (*Shubert and Harris*, 1968; *Ulrich and Weber*, 1972), 气体放电聚合 (Polymerization by gas discharge) (*Tien et al.*, 1972), 紫外线曝光 (exposure in uv light) (*Ostrowsky and Jacques*, 1971; *Weber et al.*, 1972; *Tomlinson and Weber*, 1975), 和更重要的扩散 (*Taylor et al.*, 1972; *Martin and Hall*, 1972; *Kaminow and Carruthers*, 1973; *Carruthers et al.*, 1974; *Hammer and Philips*, 1974; *Schmidt and Kaminow*, 1974; *Noda et al.*, 1974; *Standley and Ramaswamy*, 1974; *Garmire*, 1975; *Chinn et al.*, 1975; *Minakata et al.*, 1975; *Ramaswamy and Standley*, 1975), 以及各种外延法 (*Hall et*

al., 1970; Tien et al., 1972; Cho and Reinhart, 1972; Ballman et al., 1973, 1975, Rand and Standley, 1972; Hammer et al., 1972; Goell, 1973; Garmire, 1973; Tracy et al., 1973; Logan and Reinhart, 1973; Tien et al., 1974; Miyazawa, 1973; Wolfe et al., 1974; Reinhart et al., 1974; Miyazawa et al., 1975; Kondo et al., 1975; Ralston et al., 1975; Fox et al., 1975; Kahn, 1970; Ramaswamy, 1972; Chang, 1971; Kleiknecht, 1974; Tsand and Wang, 1976; Boetz et al., 1976; Merz and Cho, 1976; Merz et al., 1976; Tensen et al., 1975)。

把集成光路想像成如图 2 所示。它由本身就是波导并由波

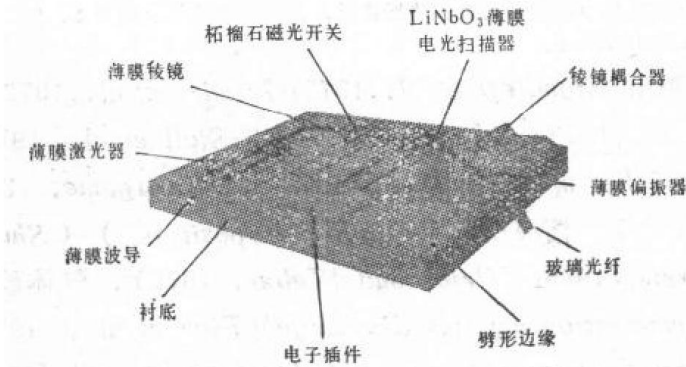


图 2 历史上我们以为集成光路应包含所有各种类型的光学器件，如图中所示。器件由薄膜形成，并用薄膜波导连接。但是，随着集成光学的发展，我们认识到这样的光路是难以制成的。现在我们相信一个光路应仅包含两种或三种不同类型的器件。虽然每一种器件，可以有許多个。例如，由许多激光二极管和波导组成的光路就可以满足我们大部分需要

导连接的许多光学元件组成。可把光路中的光波看作是沿薄膜二维平面传播的表面波。因为每个波导中的场必须满足边界条件，所以必有一组和波导相适应的简正模式。光波可以其中的

任一简正模式传播。如果给每一简正模式分配一个信道，一个集成光路就能够同时传输许多信道。每一简正模式可用与薄膜平面内具有本征值 β 的本征矢量表示。

集成光学的实质就是处理二维薄膜平面中的表面波及其光学。早在1969年，曾用一个修正的Snell定律去解释波导间出现的光折射现象(Tien and Ulrich, 1970; Tien and Martin, 1971)。并应用这一定律发明了薄膜棱镜、透镜和其他无源光学元件(Ulrich and Tien, 1969; Shubert and Harris, 1970; Ulrich and Martin, 1971; Righini et al., 1972; Tien et al., 1974, 1975; Harper and Spiller, 1974, 1975; Verber et al., 1976)。那时开始的另一重要进展是把衍射光栅应用到各种光学元件中去。光栅是一个在波导上表面或薄膜-衬底界面上形成的简单的刻纹表面。这种含有光栅的波导叫刻纹波导，或简称周期性结构。在波导中用反射光的光栅是由米勒(Miller, 1969)首先提出的。不久，人们发现了利用光栅把光波耦合到波导中去的可能性(Dakss et al., 1970; Kogelnik and Sosnowski, 1970)。1971年，科结尔里克(Kogelnik)和香克(Shank)提出用刻纹波导做激光器的光腔，根据这个原理，他们做出一个染料激光器。他们称之为分布反馈激光器。这个想法很快推广为布喇格(Bragg)反射激光器(Kaminow et al., 1971; Wang, 1974)。不久前也应用衍射光栅做成带阻滤波器、电光偏转器和模阶变换器。上述薄膜器件的初步成功，给集成光学建立了一个坚实的基础。

利用半导体 $p-n$ 结型二极管进行光调制是从60年代初期开始的。例如，纳尔逊(Nelson)和莱因哈特(Reinhart)在1964年就发表了在GaP结加反偏压实现光调制。最近，莱因哈特和米勒(1973)用AlGaAs/GaAs/AlGaAs双异质结制成了有效的调制

器。除了研究 $AlGaAs$ 合金的工作以外，田炳耕等(1972, 1974)发表用铁-石榴石薄膜作光波导的磁光开关。他们所用的薄膜原来是发展来做磁泡器件的。1972-1975年间用8种不同方法制成了电-光和声-光常数很大的 $LiNbO_3$ 单晶薄膜。过去材料科学家从来没有对单独一种材料发生过那样大的兴趣。上述方法有 Li 的外扩散(Kaminow and Carruthers, 1973; Carruthers et al., 1974)和 Nb (Hammer and Philips, 1974; Ramaswamy and Standley, 1975), 铜(Noda et al., 1974)和过渡金属(Schmidt and Kaminow, 1974)的内扩散; 用溶体(Ballman et al., 1975; Tien et al., 1974; Miyazawa, 1973)和加助溶剂进行外延生长(Ballman et al., 1975; Miyazawa et al., 1975; Kondo et al., 1975); 反应溅射(Gia Russo et al., 1973; Takada et al., 1974); 离子交换(Shah, 1975)和离子注入(Wei et al., 1975)。更重要的是经过广泛研究, 制成了薄膜磁光、电光和声光器件(Tien et al., 1972, 1974; Schmidt and Kaminow, 1975; Kogelnik and Schmidt, 1976; Noda et al., 1975; Kaminow et al., 1974, 1975; Tien et al., 1974), 它们制作简单, 操作方便。在大多数情况下较过去的相应的体器件的效率 high。

目前, 集成光学的研究已和光通信相结合。到现在为止, 有三种半导体激光二极管可在室温下连续工作。因此, 自然成为将来的光通信系统中光源的选用对象。其中之一是熟知的 $AlGaAs/GaAs/AlGaAs$ 双异质结激光器, 其发射波长接近 $0.89\mu m$, 即近红外光(Alferov et al., 1970; Pansih et al., 1969)。另外两种, 分别采用 $AlGaAsSb/GaAsSb/AlGaAsSb$ (Nahory et al., 1976)和 $InP/GaInPAs/InP$ (Hsieh, 1976)异质结, 还处在研究阶段。它们的发射波长在 $1.0\sim 1.3\mu m$ 之

间。对于光通信所用的玻璃纤维，这一波长范围的色散和传输损耗最小(要全面了解半导体激光器的研究情况可参阅帕尼西(Panish), 1976)。由于在激光器研究中发展起来的这一先进的半导体工艺技术。人们自然会想到用Al-Ga-As或其他Ⅲ-V族合金化合物制成包含有波导、探测器、调制器和激光器的单块集成光路。在这种半导体光路中,常常用p-n结和异质结作波导来做成调制器和激光器。60年代初期已发现p-n结能相应有效地引导光波(Bond et al., 1963; Yariv and Leite, 1963; Kressel and Nelson, 1969)。等离子体(Plasma)对砷化镓等半导体折射率的贡献,是随电子浓度的增加而减小。当p-n结加反向偏压时,电子被扫出耗尽层外,从而形成高折射率波导层。因为折射率也随Al在Al-Ga-As系统中的浓度的增加而减小,所以在两层低折射率的Al-Ga-As中间夹一层GaAs p-n结组成的异质结可以形成更好的波导。到目前为止,这些p-n结和双异质结波导已用外延生长、扩散、渗杂和离子注入方法形成。AlGaAs异质结制成的调制器效率和LiNbO₃器件差不多(Reinhart and Miller, 1972; McKenna, and Reinhart, 1976)。用相似的异质结制成的分布反馈激光器也已经可以在室温下连续工作。(Nakamura et al., 1975; Casey, Jr. et al., 1975)

虽然从60年代起就充分研究了GaAs和有关合金化合物,但新技术仍在不断出现。首先,如前所述,中村(Nakamura)等(1975)和小凯西(Casey·Jr)等(1975)的工作已经表明可以用AlGaAs系统做成有效的DFB激光器。其次,洛干(Logan)和莱因哈特(1973)采用选择性腐蚀法形成沟道波导,科默福德(Comerford)和佐里(Zory)(1974)用同样的方法形成GaAs的刻纹波导。在他们之后,人们发现可用液相外延法在选择性腐蚀沟道中生长波导和激光器。这种技术李(Lee)等(1976)叫做

“埋层外延”，伯恩哈姆(*Burnham*)和西弗里斯(*Scifres*)(1975)叫“腐蚀埋层结构”，伯茨(*Boetz*)等以及曾焕天(*Tsang*)和王适(*Wang*)(1975)叫“腐蚀和填充”。从那时起，选择性腐蚀和选择性生长已成为集成光学的重要工艺(见IV.E.中的讨论)。第三，塚田(*Tsukada*)(1974)证明用埋层异质结有在垂直和横向两个方向同时限制光波和载流子的可能性，从而提高了激光二极管的效率。第四，由于阿瑟等(*Arthur*, 1968; *Cho*, 1971; *Cho and Arthur*, 1975)的先驱性工作，使分子束外延可与液相外延相竞争。最后，R.A.洛干用在装GaAs熔体的阱中加楔子的方法，发展了液相外延工艺。用这种新工艺形成了有劈波边缘的薄膜和各成分变化的薄膜(*Reinhart and Logan*, 1975; *Merz et al.*, 1975; *Logan and Reinhart*, 1975)。主要由于这些半导体工艺技术的工作和光刻技术的不断改进，以形成亚微米结构，我们愈加相信实现中规模集成光路是可能的。

此外还应指出用薄膜元件组成光路的许多新技术。1973年发现，简单地把薄膜的边缘做成劈形并把它们重叠起来形成光滑结面，就有可能把两个波导互相连接起来。从那时起，劈形薄膜或波导的劈形边缘在各种光路结构中一直起着重要作用(*Tien and Martin*, 1971; *Tien et al.*, 1973, 1974, 1975; *Reinhart and Logan*, 1974, 1975; *Logan and Reinhart*, 1975; *Merz et al.*, 1975)。另一种重要技术是把低折射率器件与高折射率衬底隔离(*Ostrowsky et al.*, 1973; *Tien et al.*, 1975)。有源器件如激光器和调制器是需要单晶衬底上用外延或扩散层做成的。上述衬底的折射率很高(在 $n=2.0$ 到 $n=3.6$ 之间)因而不适宜制作低折射率($n=1.49-1.9$)的无源器件。这个想法是在一部分衬底表面上复盖一层金属薄膜或低折射率介质薄膜的隔离层，从而可以直接在衬底上形成有源器件，而在隔