

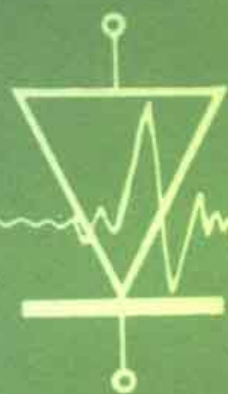
当代科技重要著作·信息领域

半导体光电子技术丛书

半导体集成光电子学

[美] W·T·TSANG 主编

江剑平等译 杜宝勋校



电子工业出版社
清华大学出版社

711183

371183

C07

当代科技重要著作·信息领域

半导体光电技术丛书

半导体集成光电子学

W. T.

[美] W. T. TSANG 主编

江剑平等译 杜宝勋校

电子工业出版社

清华大学出版社

(京)新登字 055 号

内 容 提 要

本书系《半导体光电子技术》丛书中的一个分册,共三章,即集成有源和无源光学器件的原理和特性、光电子集成器件、半导体激光放大器。本书说理简明、内容翔实,对我国从事光电子技术教学、科研、工程技术及其他有关的人员来说是一本难得的参考书。

半导体光电子技术丛书
半导体集成光电子学
[美] N. T. TSANG

江剑平等译 杜宝勋校

责任编辑 吴金生

*

电子工业出版社 出版
清华大学出版社

电子工业出版社发行 各地新华书店经售

电子工业出版社计算机排版室排版

北京顺义李史山印刷厂印刷

开本:850×1168毫米 1/32 印张:10.625 字数:285千字

1993年3月第1版 1993年3月第1次印刷

印数:2500册 定价:11.00元

ISBN7-5053-1995-7/TN·600

半导体光电技术丛书

编 审 组

王启明 周炳琨 杜宝勋
江剑平 孙宝寅 吴金生

出版前言

由美国 AT&T 贝尔实验室 W. T. TSANG 主编的《光通信技术》丛书是一套在世界享有声誉的学术专著。该套丛书共分七册,前五册讨论的是半导体光电子技术,载入《半导体与半金属》第 22 卷,后两册讨论的是光纤技术及传输系统,载入《光纤通信》论文集。现在我们出版了前五册的中文版,并将原书各册的顺序作了调整,旨在介绍国外光电子技术领域研究的新成果,并定名为《半导体光电子技术丛书》。它包括:

- 第一册 半导体注入型激光器(I)
- 第二册 半导体注入型激光器(II)和发光二极管
- 第三册 半导体光检测器
- 第四册 半导体集成光电子学
- 第五册 半导体材料生长技术

原书由美国、日本、法国的 38 位专家撰稿,全面、系统地总结了近 20 年来半导体光电子材料、器件与集成技术研究方面的重要成果,既有理论和技术的论述,又提供了大量的数据、资料,对我国从事半导体光电子技术的教学、科研及工程技术人员,将是一套具有借鉴和启迪作用的参考书。

丛书得以出版,要感谢国家高技术光电子专家组的推荐与支持,感谢杜宝勋副研究员、江剑平副教授在组织这套丛书的翻译及审校方面所作的大量工作。欢迎读者对本书存在的缺点和错误给予批评指正。

1993 年 3 月

原书序言

当印第安人利用烟火传递信息时,便蕴育着现代光通信的想法。当时由一个山顶上放出断断续续的青烟就是一种数字信号;这信号是以青烟的出现与消失为编码,确实是二进制的。光是信息载体,空气是传输介质,人眼是光检测器。信号由一个山顶传向另一个山顶,其作用相当于是信号的再放大,正如今天的中继器。1880年,亚历山大·格拉汉·贝尔采用太阳光束作为载体将声音信号传递了200米以上的距离,称之为光话。远在这个历史性实验之前,人类就设计并使用了光通信。然而直到1977年才敷设了第一个商用光通信系统。这项新技术的完善,包括研制坚固耐用的近红外光源—可对信息进行调制,低损耗的传输介质,灵敏的光检测器—可无误地恢复并再现光源发出的信息。

1958年,激光器的问世及演示性实验在光通信方面立即引起了新的兴趣和广泛的研究,然而光通信实用化的美好前景,只有当三个主要技术问题日趋成熟后才展现出来。第一个技术问题是1962年研制成功电流注入型半导体激光器,1977年可做到其连续工作寿命达一百万小时以上;第二项技术是在1970年获得了光损耗为20dB/km的掺杂石英光纤,证实了高纯石英与同类介质相比具有最低的光损耗。1973年发现,经过适当热处理的掺硼石英的折射率低于高纯石英的折射率。最近又研制成功了超低损耗(0.12dB/km)的掺锗石英光纤;第三项技术是在七十年代研制成功了低噪声光检测器,它使超高灵敏度光接收机变为现实。可以说,高可靠的注入型半导体激光器、低损耗光纤及低噪声光检测器的研究进展,促进了光波通信技术的实用化,并显示出了比普通的电传输系统的优越性。

由于光纤通信涉及到许多技术问题,包括电通信系统、玻璃及半导体光电子技术等,在过去的 20 年内人们进行了大量的研究工作,我们试图在这套丛书中总结所积累的知识,并定名为《光波通信技术》。这套丛书由七册组成,前五册讨论半导体光电子技术,据其内容载入《半导体与半金属》;而后两册,一册是讨论光纤技术,另一册是讨论传输系统,他们被载入厉鼎毅和 W. T. TSANG 编著的《光纤通信》。

本卷第一册讨论半导体生长技术,详细说明了各种 III-V 族化合物半导体的外延生长技术和材料缺陷,包括液相外延、分子束外延、常压和低压金属有机化学汽相沉积、以及卤化物和氯化物输运汽相沉积。每种技术单独成章,而半导体材料缺陷则另有一章专门讨论。

本卷第二册和第三册讨论光谱范围为 $0.7-1.6\mu\text{m}$ 和 $2\mu\text{m}$ 以上的注入型激光器和发光二极管的制作、特性和应用。具体地说,第二册各章包括半导体激光器的动态特性与亚皮秒脉冲锁模、高速电流调制和光谱特性、动态单频分布反馈激光器和解理耦合腔半导体激光器。第三册各章介绍的有关内容是,半导体激光器方面的是评述激光器结构及其性能比较、横模稳定方案、半导体激光器发射机的功能可靠性以及波长超过 $2\mu\text{m}$ 的半导体激光器。发光二极管方面的讨论分为三章,即发光二极管器件设计、发光二极管的可靠性及它在传输系统中的应用。第二册和第三册应被视为一个整体,而不是分别独立的两册。

本卷第四册专门讨论光检测技术,详细地介绍了雪崩光二极管的原理,采用 Si、Ge 和 III-V 族化合物制作的雪崩光二极管及光晶体管。还有一章讨论用于高速率长波长光通信系统的雪崩光二极管接收机的灵敏度。

本卷第五册讨论集成光电子学和半导体光电子器件的其它应用,详细说明可以集成的有源和无源光器件的原理和性能以及集成光电子器件的性能。还有一章讨论半导体激光器在光传输系统中作为光放大器的应用,这是其最新应用的一个示例。

由于题材不同,本丛书的后两册载入不同的论文集为宜。讨论光纤技术的一册,包括光纤的设计和制作、光学特性及非线性光学等。最后一册讨论光传输系统,包括光波系统基础,光发射机和光接收机设计理论,半导体激光器在相干光传输系统中的频率调制和相位调制。

所以,这套包括七册的丛书全面地讨论了整个光波通信技术。丛书的每位作者均来自从事该领域研究和发展的单位。

作为一名客座编辑,我衷心感谢 R. K. Willardson 和 A. C. Beer,他们给了我一个宝贵的机会,把这样一个重要的、具有爆炸性的技术在《半导体与半金属》上介绍给读者。我也衷心感谢诸位作者及其所在的单位,正是在他们的努力和支持下,本丛书才得以问世。最后,我要向 AT&T Bell 实验室为完成此项工作所提供的一切方便和必要的条件表示敬意,也向 C. K. N. Patel 为本丛书撰写前言表示敬意。

W. T. Tsang

目 录

出版前言	(I)
原书序言	(II)
第一章 集成有源和无源光学器件的原理和特性	(1)
I. 引言	(2)
II. 光波导:模式和传播常数	(4)
III. 组合波导系统的分析	(29)
IV. 导波控制器件	(69)
V. 半导体激光器	(101)
VI. 集成化	(174)
参考文献.....	(194)
第二章 光电子集成器件	(205)
I. 引言	(205)
II. FET 电路	(211)
III. 半绝缘 GaAs 衬底	(218)
IV. 半绝缘衬底上的激光器	(219)
V. 半导体激光器的集成	(223)
VI. 集成化端面	(239)
VII. 光检测器和 FET 的集成.....	(247)
VIII. 单片集成宽带放大器	(254)
IX. 异质结构双极晶体管	(256)
X: 结语与展望	(263)
参考文献.....	(264)
第三章 半导体激光放大器	(268)

I. 引言	(269)
Ⅰ. 线性放大器	(271)
Ⅱ. 注入锁定放大器	(295)
Ⅳ. 光放大器的系统应用	(303)
V. 结语	(323)
参考文献	(324)

第一章 集成有源和无源光学器件的原理和特性

Shyh Wang

加州大学伯克利分校电机工程与计算机科学系

张敬明 译

I. 引言

II. 光波导: 模式和传播常数

1. 平面各向同性波导
2. 扩散波导和弯曲波导
3. 抛物形渐变折射率波导
4. 二维波导
5. 二维波导的模式特性

III. 组合波导系统的分析

6. 耦合模分析
7. 本征模分析
8. 各向异性或旋光材料波导中波的传播
9. 楔形速度耦合器
10. 周期性波导
11. Y 结: 分束器和合束器

IV. 导波控制器件

12. 电-光效应
13. 偏振调制器
14. $\Delta\beta$ 反转开关和 $\Delta\beta$ 相移偏振调制器
15. Y 结和 Mach-Zehnder 干涉调制器
16. 干涉模拟-数字转换器和数字驱动放大调制器
17. 波长滤波器

V. 半导体激光器

18. 双异质结构激光器

19. 增益导引激光器
20. 折射率波导激光器
21. 激射光谱、调制特性和噪声特性
22. 分布反馈激光器和分布布拉格反射激光器
23. 干涉激光器、多腔激光器和耦合波导激光器
24. 激光列阵和面发射激光器
25. 讨论

VI. 集成化

26. 混合集成
27. 单片集成
28. 元件要求和设计考虑

参考文献

I. 引 言

光通信是以光源、处理单元、传输介质和探测器的积木块技术为基础的。二十世纪六十年代初期,激光器的发明及随后低损耗光纤的相继出现,为光通信技术的研究和发展提供了共同努力的动力。二十世纪六十年代后期,在使光学系统与现代薄膜技术兼容的努力中,出现了“集成光学”的概念。该思想是在共同衬底上建立各种光学器件,然后用薄膜波导在衬底内将它们连接起来。在以后发展集成光学中,一个关键性的问题——材料兼容性变得十分重要。后来,集成光学目标发生了变化,从全光集成到局部光集成和从围绕发展集成光学技术到探索和实现导波光器件。我们从集成的角度来讨论本章的内容。

本章的内容分成五部分。第一部分,在节Ⅰ中介绍无源介质波导。光集成需要波导,不仅提供二个光学器件的内部连接,而且需要把光束限制在光学器件中,使器件性能最佳化。集成光学的现状表明,波导所起的第二种作用比第一种作用更加广泛。第二部分,在节Ⅱ中讨论复合波导系统,它们包括导引波之间的相互作用。许多光学器件利用了并行或正交偏振的两个波和同向或反向传播的

两个波的相互作用。这部分的讨论,为后面介绍光学器件准备了一个共同的背景材料。

第三部分,在节Ⅳ中讨论导波控制器。在光通信系统中,处理单元组成基本模块以产生光脉冲或者对光信号调制和解调。即使在不久的将来,人们仍希望用电路而不是用光路来作为信号处理的主要部分,光学器件可以起到简单而单一的功能,它们具有补充而不是替代电路的功能,利用光学器件的组合也可以实现复杂的功能。但是,该节的目的是进行有关基本原理的评述,而不是对导波光学器件进行广泛讨论。

第四部分,在节Ⅴ中集中介绍半导体激光器。因为光源在这套丛书中已被详尽地论述,这里重点论述模式的稳定性和引起模式不稳定的物理机制。在激光器中,有源层也起导引层的作用,所以,增益的任何空间变化或瞬时的起伏对激光器腔的导引特性都有附加的影响。只有当控制激射条件的物理机制很明确并且可控制时,半导体激光器的潜力才可以完全被发挥出来。为获得单波长半导体激光器的稳定工作,该节将介绍与此有关的背景知识。

最后一部分,在节Ⅵ中介绍光集成的现状和展望。由于电子器件和光学器件的集成是 Margalit 和 Yariv 在第二章中所讨论的题目,现在我们仅把讨论局限于光学器件的集成。正如前面提到的,目前的讨论完全局限于在共同衬底上的光集成,而进一步发展的关键在于克服材料和器件的兼容性问题。现在讨论的目的是论述光集成问题以及简要评述光集成的现状。

要给出集成光学和与其有关领域参考文献的一份详细清单几乎是不可能的,为了克服这种困难,我们提供下面的常用参考文献。作者认为它们不仅在提供技术信息方面非常有益而且也是一个较全面的参考文献。目录:Miller(1969);Miller等(1973);Tien(1977);Marcuse(1972a,1974);Midwinter(1979);Miller和Chynowith(1979);Tamir(1979);Hunsperger(1982);Alferness(1981a);Kressel和Butler(1977);Casey和Panish(1978a);Thompson(1980)。

II. 光波导:模式和传播常数

集成光学的基本元件是光波导。它最简单的功能是在两个光学器件之间起互连的作用。在无源器件例如调制器中,它能提供一种介质,在该介质中控制信号可以调制和控制光信号的传播特性。在有源器件例如激光器中,它能提供激光辐射与物质相互作用的介质。与微波波导不同,光学波导通常由低损耗介质或者半导体构成。但是,和微波波导一样,光波导也有自己固有的传播模式。在给定波长上,固有模式有特定的场分布和独自的传播常数。为了使光学器件最有效地工作,十分希望而且有时是必需将光场限制成单模。所以在设计波导器件时,知道波导模的特性是很重要的。在本节中,我们将介绍光波导的基本知识和在集成光路中使用它们的一些重要考虑因素。

这部分仅介绍基本类型的光波导。导波器件要求的导引结构通常比基本类型更复杂。在讨论有关器件时,我们再介绍组合的和更复杂的波导。在制造和分析上,最简单的波导是一维波导。根据折射率的变化和波导内的场分布,可以把一维波导分成三类:(1)平面各向同性波导。(2)扩散波导和弯曲波导。(3)渐变折射率波导。平面各向同性波导的特征是波导和包层区边界上折射率有突然变化。这些波导用溅射淀积或液相外延(LPE)生长来制造。扩散波导和弯曲波导的特征是折射率指数变化。折射率的变化是由杂质扩散或者弯曲边界引起的。渐变折射率波导的特征是折射率近抛物线形变化,形成高斯光束。这些波导的制造需要精确控制生长中的薄膜成分。1至3节详细讨论了三种基本类型的一维波导。第4节给出了二维波导的定性讨论。因为波导器件中使用的二维波导通常无须精确分析,所以,需要用数值方法精确确定传播常数的题目不在其内。第5节中的讨论集中到二维波导的特性上,这需要一些近似公式。我们选择二个问题,一是关于导引模的场分量和在波导边界处它们的关系,另一个是叫做有效折射率法的近似方

法,该方法通常用于定量讨论二维波导的模式特性。两个讨论为使用二维波导的导波光学器件的进一步分析提供了有效的背景材料。

1. 平面各向同性波导

我们讨论的起点是平面(或者平板)各向同性波导,两个较低折射率 $n_1 < n_f$ 和 $n_2 < n_f$ 的介质之间夹一层较高折射率 n_f 的薄膜。由于三层介质都各向同性,可以用三个常数表示它们的折射率。分析平板波导中波的传播有二种处理方法,射线光学方法和波动光学方法,如图 1 所示。考虑射线路径 ABC。为了在边界上获得全反射,入射角 θ 必须大于临界角 θ_c 。

$$\theta > \theta_c = \sin^{-1}(n_{1,2}/n_f) \quad (1)$$

对给定的模式,C 点与 A 点的相位差必须是 2π 的整数倍。因此射线将自身重复。该条件迫使 θ 必须取一定的分立值 θ_m 。当折射率 $n_p > n_f$ 的棱镜放在薄膜上时,光可以在一定的分立角上耦合进薄膜或者从薄膜耦合出来。因为平板波导的平面性质,从薄膜耦合出来的光以分立的 m 线出现(Tien 等人,1969a)。

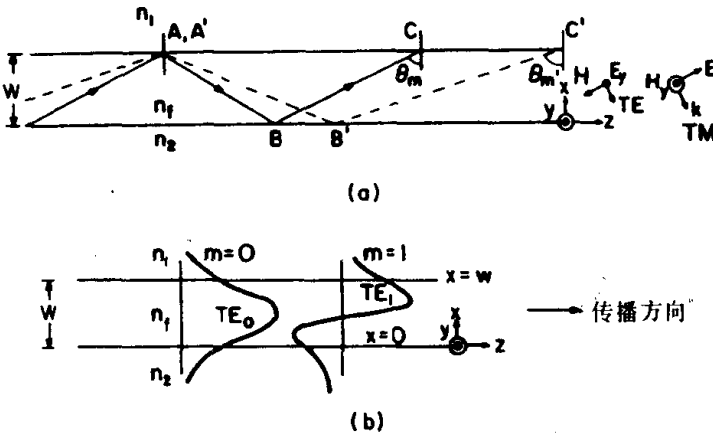


图 1 用于确定平板波导中传播本征模的两种方法:(a)射线光学方法,把导引光束看作沿锯齿形路径的射线,例如具有本征入射角 θ_m 的 ABC 路径。(b)波动光学方法,用本征场分布表述导引光束

虽然对在平板中传播模式的早期分析是以射线光学方法为基础的 (Tien, 1971; Tien 和 Ulrich, 1970), 接踵而来的便是波动光学方法。为了简单明了, 我们假设具有折射率 n_1 和 n_2 的两个包层区是半无限的, 薄膜厚度 W 有限。波动方程

$$\nabla^2 \mathbf{E} = (n_i^2/c^2) \partial^2 \mathbf{E} / \partial t^2 = -n_i^2 k_0^2 \mathbf{E}, \quad i = f, 1 \text{ 或 } 2 \quad (2)$$

对应于 \mathbf{E} 场的两个正交方向的偏振有二组正交的解。(2)式中, c 是光速, 而 $k_0 = \omega/c = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ 。参考图 1 表示的直角坐标系, 并选择 x 轴表示横向 (或者膜厚方向) 而 z 轴表示传播方向。 y 方向上 (薄膜平面上的一个方向, 并垂直于传播方向) \mathbf{E} 的一组解叫做 TE 模式, y 方向上 \mathbf{H} 的另一组解叫做 TM 模式。

对 TE 模式, $E_y(x, z, t)$ 取下面的形式

$$E_y(x, z, t) = F_m(x) \exp[j(\omega t - \beta z)], \quad (3)$$

其中, $F_m(x)$ 描述横向 m 阶模的场分布, 而 β 表示传播常数。为简单起见, 进一步假设介质没有损耗, 所以 β 是实数。我们的任务是求解 β 的本征值和 $F_m(x)$ 的本征函数。对于导引模式, 为了限制光能, 在两包层区内 $F_m(x)$ 必须是衰减的。所以, 我们令

$$F_m(x) = \begin{cases} A \cos(k_z W + \varphi) \exp[-p_1(x-W)] & \text{对 } \infty > x > W \\ A \cos(k_z x + \varphi) & \text{对 } W > x > 0 \\ A \cos(\varphi) \exp(p_2 x) & \text{对 } 0 > x > -\infty, \end{cases} \quad (4)$$

其中, A 和 φ 是两个参数。 $F_m(x)$ 的形式是这样选择的, 使得在二个边界上 E_y 能自动地满足连续性。磁场 \mathbf{H} 可以从旋度方程得到。为了满足边界条件, 重要的分量是 $H_z = (j/\omega\mu_0) \partial E_y / \partial x$ 。令 $H_z = G_m(x) \exp[j(\omega t - \beta z)]$ 。在三个区中分别有

$$-j\omega\mu_0 G_m(x) = \begin{cases} -p_1 A \cos(k_z W + \varphi) \exp[-p_1(x-W)] \\ -k_z A \sin(k_z x + \varphi) \\ p_2 A \cos(\varphi) \exp(p_2 x) \end{cases} \quad (5)$$

使 H_z 在 $x=0$ 和 $x=W$ 处连续, 得到

$$k_z W + \varphi = \tan^{-1}(p_1/k_z) + m' \pi \quad (6)$$

和

$$\varphi = -\tan^{-1}(p_2/k_z) + m'' \pi \quad (7)$$

二个附加项 $m' \pi$ 和 $m'' \pi$ 是考虑了正切函数的周期性。

对 TE 模式,从(6)和(7)式消除 φ 得

$$k_z W - \tan^{-1}(p_1/k_z) - \tan^{-1}(p_2/k_z) = m\pi \quad (8)$$

其中 m 是整数。(8)式叫做模式方程。对 TM 模式,只要把 \mathbf{E} 场和 \mathbf{H} 场的作用交换,并且进一步认为 $E_z = (-j/\omega\epsilon_0 n_1^2)(\partial H_x/\partial x)$ 。所以,对 TM 模式,相应的方程为

$$k_z W - \tan^{-1}(n_f^2 p_1/n_1^2 k_z) - \tan^{-1}(n_f^2 p_2/n_2^2 k_z) = m\pi \quad (9)$$

为得到(8)和(9)式中 $p_{1,2}$ 和 k_z 之间的关系,把(3)和(4)式代入(2)式,于是得到

$$\beta^2 = k_0^2 n_1^2 + p_1^2 = k_0^2 n_2^2 + p_2^2 = k_0^2 n_f^2 - k_z^2 \quad (10)$$

由于 p_1 和 p_2 与 k_z 有关,(8)和(9)式中仅有一个未知数。对每个整数 m ,仅有一个 k_z 的本征值。一旦得到 k_z ,从(10)式可以得到传播常数 β ,并从(4)式的 $F_m(x)$ 或(5)式的 $G_m(x)$ 可以计算出场分布。最后,我们要指出,(8)和(9)两个模式方程与从射线方程分析得到的结果相同(Tien, 1971; Tien 和 Ulrich, 1970)。

图 2(a)表示波导 TE_m 和 TM_m 模式的归一化传播常数 β/k_0 与薄膜厚度 W 函数关系的一般特性。几条曲线是有规则的。首先,为使 p_1 和 p_2 是实数, β 必须分别大于 $k_0 n_1$ 和 $k_0 n_2$ 。所以,波导模的 β 值必须在 $k_0 n_f$ 和 $k_0 n_1$ 或 $k_0 n_2$ 中大的那个之间。而且从(8)和(9)式看出,对给定的 m ,一个 k_z 值仅给出一个 W 值。由于以反正切表示的角度随 k_z 增加单调地减小, W 也一样。所以, β 值随 W 的增加单调地增加,并且当 W 非常厚时, β 值接近薄膜材料的体值 $k_0 n_f$ 。第二,对 TM_m 模式,由于 $n_f^2/n_{1,2}^2$ 因子,反正切表示的角度较大。所以,对一个给定的 β 值, TM 模式的 W 值总是比对应 TE 模式的大。我们可以用 $\pi/k_z = \pi/(k_0^2 n_f^2 - \beta^2)^{1/2}$ 对 TE₀ (或 TM₀) 模式的 β 曲线沿横坐标 (W 轴) 逐渐位移曲线,以获得 TE_m (或 TM_m) 模式的 β 曲线。最后,在图 2(b)中,给出 $n_1 = n_2$ 的对称平板波导 TE 模式的 β 和 W 之间的归一化关系。如图所示,以无量纲量 b 和 V 表示时,(8)式变成普遍的形式。所以图 2(b)表示的曲线,对以后是有参考价值的。