

波导渐变器过渡器和耦合器

〔西德〕F. 斯波莱德 H.-G. 翁格尔 著

钦耀坤 译

钱景仁 校

科 学 出 版 社

1 9 8 4

内 容 简 介

本书将波导渐变器、过渡器和耦合器作为不规则波导应用耦合波理论进行了全面的分析。

书中第一至三章论述耦合波方程，第四至七章应用耦合波理论分析了波导渐变器、过渡器和耦合器，还介绍了几种对于杂模激发最小的过渡器轮廓曲线和分布函数进行综合的设计方法，这是全书的主要部分。最后两章用耦合波理论阐述了光波导渐变器和耦合器。

本书理论分析与工程应用密切结合，书中列举了一些典型的微波和光波器件。例如 TEM 传输线耦合器、阶梯式和渐变式波导过渡器、波导间的多孔耦合器，以及平面光路中介质薄膜波导间的渐变器和过渡器。

本书可供从事微波和导波光学等研究的科技工作者和高等院校有关的师生阅读参考。

F. Sporleder and H.-G. Unger

WAVEGUIDE TAPERS TRANSITIONS AND COUPLERS

Peter Peregrinus Ltd., 1979

波导渐变器过渡器和耦合器

〔西德〕 F. 斯波莱德 H.-G. 翁格尔 著

钦耀坤 译

钱景仁 校

责任编辑 刘兴民 张兆富

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1984 年 9 月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1984 年 9 月第一次印刷 印张：10 1/4

印数：0001—4,100 字数：232,000

统一书号：15031·591

本社书号：3668·15—7

定价：1.60 元

写 在 前 面

在微波技术中，以空心金属波导管形式组成的各种类型的波导渐变器、过渡器和耦合器等是最常用的基本元件，也是其他一些器件的基础元件。当频率进入毫米波和亚毫米波，普通金属波导的应用虽然受到了很大的限制，但象过模波导和介质波导等一些主要波导传输线的应用仍然离不开这些基础元件。近十多年来，由于低损耗光导纤维的突破，以开波导形式组成的这类元件在光通信及平面和集成光学中越来越多地获得了广泛的应用。但是，迄今为止，还没有一本专门的著作以统一的观点全面地系统地论述这些基础元件，许多资料散见于各种杂志和书刊中。本书将这类器件作为不规则波导处理，用耦合波理论的观点作了统一论述，在某种程度上弥补了上述缺陷。各种波导渐变器、过渡器（不论是渐变型还是阶梯型）和耦合器，都可以看作是某种类型的不规则波导。在规则波导中彼此独立传播的波导模式，在不规则波导中就要引起波型之间的相互作用，也可能产生波型之间的相互转换，视耦合机构的不同而定。波型之间的耦合和转换对某些器件而言是不希望有的现象，对另一些器件而言却可能正是利用这种原理来工作的。耦合波方程描写了波在不规则波导中的传播规律和开波导间的耦合问题。耦合波理论能解决的波导不规则性包括波导的弯曲、填充介质的改变、截面变化和表面阻抗的改变，还包括光波导中折射率的变化和介质各向异性等。在自然界中，光、电、声等各种波动现象有着共同的内在规律，近年来已发展成为一门新的专门学科——波科学。耦合波理

论作为波科学的基础理论，特别是在近十多年来平面和集成光学技术的迅猛发展和光导纤维的逐步实用化，大大丰富了耦合波理论的内容，反过来又促使耦合波理论有了新的发展。本书从一个侧面反映了这些问题。因此，对于从事微波和导波光学的高校师生和有关科技人员来说，本书不仅可以作为研究和设计这类器件的参考书，也可以作为深入研究耦合波理论的人门书。

用耦合波理论的观点统一处理一系列微波问题，黄宏嘉教授早在 1963 年出版的《微波原理》^[1] 中就已作了大量工作。尔后，又先后发表了多篇论文，近年来，又把耦合波理论推广应用于开式光波导中的波型耦合问题。他的一些开创性工作大都是独立完成的，有些论文比国外学者发表得还要早些。最近，美国纽约理工学院微波研究所 (MRI) 特为他出版论文专集^[2]。但是，也许是出于语言上的隔阂等原因，本书作者对中国学者在本学科领域内所作的贡献未曾提及。为此，我们将国内学者有关的主要几篇论文作为补充参考文献列出，供读者参考。

本书的导论及第二、三章论述耦合波方程。这是全书的基础。在介绍不规则波导问题时，通常首先需要将实际边界条件下的电磁场展开为参考波导中各简正模电磁矢量之和，从而将麦克斯韦方程组转换为各波型幅度之间的耦合波方程。这是通常的方法，即用驻波场展开，对此本书主要介绍了两种具体做法，即由麦克斯韦方程的分部积分或由等效源法导出耦合波方程。此外，也可以用行波场展开，即所谓横截面法，本书也有所论述。

简正模按参考波导的不同有各种取法。采用不同的模展开，收敛快慢不同，出现在耦合波方程中各模式间的耦合也有强弱。一般说来，总是希望所要模式与杂模间的相互作用越

弱越好。究竟采用哪种模式主要取决于波导不规则性的特点,如它的形状,轮廓曲线的一次变率和二次变率等,带有较多的技巧性。本书主要介绍了三组常见的模,即理想模、柱波导模和喇叭模。柱波导模是几种本地简正模中常用的一种,而喇叭模与补充参考文献[3]所提出的超本地简正模的概念是相似的。以喇叭模或超本地简正模处理喇叭形的渐变器和过渡器,波型间的耦合较其他模要弱。

第四章至第七章应用耦合波理论分析了常用的波导渐变器、过渡器和耦合器,这是全书的主题部分。这里需要指出的是,当不规则波导涉及的波型在两个以上时,例如在高度过模的波导渐变器和耦合器中,首先需要将从两个波型得到的耦合波方程推广到多个波型彼此耦合的耦合波方程。在补充参考文献[4]中,把耦合波理论广义化,发展了所谓广义耦合波理论,很成功地解决了这一类问题。多波型不规则波导涉及的主要问题是,在波导的耦合段中可能存在临界截面(某一个波型在该截面上被截止)和稳相点(在稳相点附近,工作波型的相位常数和某一个杂模的相位常数相等或接近相等)。本书对于包括临界截面在内的不规则波导作了论述。关于存在稳相点的不规则波导的处理,可参考补充参考文献[1]。

最后两章将耦合波理论应用于光波导渐变器和耦合器,这类器件与微波领域里的对应器件有许多不同的特点,主要是它们的物理尺寸很小,在工艺上很难实现轮廓形状的优化设计;不过相对于波长而言,它们可以做得很长,而整体尺寸和长度在一般应用中都可以容许。因此,绝热耦合器很是合用。它无论是理论设计还是工艺制作都较方便,性能也很满意。虽然绝热耦合的原理早已有人阐述过,但在微波领域中不易实现;只是近年来才在导波光学技术中崭露头角,并很快获得了广泛的应用。本书对此作了扼要的介绍。

对于开波导形式的光波导,必须考虑到辐射模及其与传播模的相互耦合作用,所遇到的主要困难在于这类模式具有一个连续谱. 本书对此没有深入讨论. 在补充参考文献[5]中首先提出将开波导中的连续模谱离散化,就可同闭波导一样将耦合波方程写成矩阵形式,从而可把原来对于闭波导中的分裂模式才成立的耦合波理论应用于具有连续模谱的开波导.

在各种不规则波导中的耦合波之间,耦合系数因波导的耦合机构不同而有很大的差异,有时是虚数,有时是实数. 它们之间是否有一定的关系呢? 在闭波导中早就发现,对于同一种类型的不规则性,用理想模和用本地模来展开时,它们的耦合系数间存在一个简单的关系. 马库塞(Macuse)在推导光纤折射率变化所造成的波型间的耦合系数时,在一定的近似下“猜出”了这一关系,称之为等效公式[在本书中有类似的公式,如式(4.3.10b)]. 补充参考文献[4]在相同的近似条件下推得了这一关系. 在补充参考文献[6]中更严格地推导了这一关系. 使得理想模、本地模和超本地模的耦合系数公式都可以互相联系起来.

本书对于从事微波、光通信、光学纤维和集成光学等专业的有关科技人员和高等学校师生,是一本有价值的参考书. 对于光波导渐变器和耦合器的内容,只要具备了前三章的基础就可直接阅读. 因此,不同的读者可以根据不同的需要选读有关的章节,而仍能保持内容的连贯性. 原书中发现的个别印刷上的错误,译文作了更正. 为便于阅读,对于个别问题加了几处注释. 本书的第七章是由郑大钊同志翻译的,特表感谢. 由于校者与译者才疏学浅,译文中错误和不妥之处望读者不吝指正.

钱景仁 钦耀坤 1982年12月

目 录

写在前面	i
第一章 导论	1
参考文献	9
第二章 耦合波方程组	11
2.1 场方程组和源	11
2.2 波在柱波导中的传播和激励	13
2.3 不规则波导的耦合波方程组	21
2.4 耦合波方程组的特点	28
2.5 弯曲波导的耦合波方程组	35
2.6 以均匀各向同性和无耗物质填充的波导	38
2.7 多孔耦合器	49
2.8 耦合介质波导	57
2.9 介质波导过渡器	72
参考文献	94
第三章 用喇叭模分析波导渐变器	95
3.1 不规则扇形喇叭	97
3.2 不规则圆形喇叭	114
参考文献	126
第四章 阶梯式波导过渡器	127
4.1 柱波导之间的阶梯式过渡器	127
4.2 波导-喇叭阶梯式过渡器	137
4.3 耦合波方程的收敛性	144
参考文献	154
第五章 单个杂波的过渡器和耦合器	155

5.1	TEM 匹配段	155
5.2	短耦合段的最佳耦合分布	167
	参考文献	181
第六章	渐变波导过渡器	182
6.1	模式变换低的高度过模的波导过渡器	182
6.2	圆波导和矩形波导的渐变过渡器	187
6.3	耦合波方程的准对角化	194
6.4	用耦合喇叭波设计波导渐变器	209
6.5	低于截止值的模式耦合	215
6.6	喇叭过渡器	227
	参考文献	235
第七章	具有杂模简并的波导渐变器	236
7.1	扇形变换器	238
7.2	矩形-扇形变换器	258
	参考文献	263
第八章	功率完全转换和接近完全转换的波耦合	264
8.1	选模式定向耦合器	265
8.2	绝热耦合	278
	参考文献	292
第九章	光波导渐变器	293
9.1	单模波导渐变器	295
9.2	单模-多模渐变器	302
9.3	多模-多模渐变器	307
	参考文献	311
补充参考文献		312
索引		313

第一章 导 论

渐变波导是一段向一端逐渐变细的电磁波导引结构。这种渐变波导在传播方向上,不仅其截面尺寸、而且其截面形状都可能逐渐变化。更广义地说,导波结构在这样的意义上可以认为是渐变的,即在波的传播方向上,它赖以构成的整个媒质分布是逐渐变化的。

例如,在大自然中,当电磁能量以光波或无线电波的形式通过大气传播时,由于温度和压力的变化,或由于它的电离状态逐点不同,就可能遇到这样的媒质逐渐变化的情况。不过,我们论述的渐变波导过渡器(以下简称渐变器)一般总是专门构造以适合某种特定的目的。

普通的导引 TEM 波的双线传输线可以作为一类简单的例子。有时我们用形状或尺寸、偶或两者都为渐变的线段来连接不同尺寸、形状相异或特性阻抗不等的传输线。入射到一段渐变传输线上的 TEM 波至少有一部分被反射。因此,一般应把渐变线做成这样的形式,使之在整个运用频带内的反射低于容许电平。

特性阻抗不等的传输线也可以通过均匀线段互相连接,均匀线段的特性阻抗应为被连接传输线的特性阻抗的居间值,在传输线之间阻抗形成阶梯式变换。适当地选择这些中间线段的长度和特性阻抗,可使不同的传输线互相匹配。这一类阶梯式阻抗变换器最简单的例子就是四分之一波长传输线变换器。

在其他类型的波导中也能遇到各种渐变器和过渡器。常

见的例如,主要在微波中应用的空心金属波导管,以及对光波很有效的介质波导。空心金属波导管通常只传输一个模式,在各种应用中它不一定总是基模,典型的例子是在圆波导中应用的圆电(H_{01})模, H_{01} 模不是最低的截止模。因此, H_{01} 模波导渐变器的设计不仅要考虑到反射小,而且还要考虑到变换为其他可传输的杂模的功率小。

当我们把一种截面的波导渐变过渡到另一种截面的波导时,原则上,在一种截面波导中传输的模可能变换为另一种截面波导中一些其他的模。完成渐变过渡时应使反射损耗小,并对各杂模的功率变换低。

波导弯头是另一类波导过渡器。在波导弯头中一般只改变波导轴的方向而截面不变。波导作缓慢的弯曲,以缓变的方式从一个方向变换到另一个方向,这样既可避免有太多的功率损耗于反射和其他杂模,也可避免反射波和其他杂模引起的干扰。如果使曲率从两端的零值逐渐向弯曲中心区域某一适当的最大值作渐变过渡,则可能使反射和对杂模的功率变换大为减小。由于这些原因,弯曲波导和波导弯头属于波导渐变器和过渡器的内容。

通过对各杂波分量的相消干扰,可以使渐变传输线和波导过渡器中的反射和模式变换保持为低值。为了使杂波的干扰互相抵消,各杂波分量的相位必须有足够的差别。这种相消干扰要求过渡器足够长,但其造价和重量使它的长度受到了限制。因此,我们应使渐变波导的长度尽可能短地满足设计要求。

光波导渐变器的设计问题是完全不同的。它们的微观尺寸很小,可容许在多个光波长的渐变器中通过相消干扰来降低模式变换,而它的绝对长度仍是比较短的。因此,光波导渐变器的长度要求并不那么苛刻。

同金属波导过渡器相比,开式结构的介质光波导渐变器不仅将部分入射波反射并转换为杂模,它们还将入射波的能量向周围空间辐射。因此,光波导过渡器的分析和设计除了要考虑到反射和模式变换以外,还必须考虑到这种辐射。对于单模光波导之间的过渡器,甚至必须将辐射作为限制其效率的主要有害因素。

所有的波导过渡器和变换器,通常在它们的传播模式(在光波导的情况下还包括辐射模)之间具有相互作用。这些模式在相连的规则波导中是彼此独立地传播的,但在过渡器的不规则区域中却能相互作用。当波导互相平行、交迭或者彼此间有其他的感应时,这种由于耦合所引起的模式相互作用,以及随之引起的功率变换也会在不同波导的模式之间发生。

因此,耦合波导的分析和波导耦合器的设计也属于这一内容。一般,平行金属波导之间的耦合是通过公共壁上的许多小孔完成的。开式介质波导则依靠其导模的横向迅衰场引起耦合。

在平行传输线中,例如在公共基片上的平行微带线,或公共电缆的几个线对间,以及在光缆的几根光导纤维之间,一般不希望有这样的模式耦合,模式之间的相互作用和变换必须保持在规定的串音电平以下。

不过,实际的波导耦合器需要将入射到耦合波导之一的一个特定模式的功率,以规定的份额转换到另一波导中的某一种模式,而变换到其他模式或导致辐射所造成的功率损耗不能太大。这种耦合问题的分析和设计,不仅在原则上,甚至在许多细节方面都同波导渐变器和过渡器的设计相对应。在两种情况下,都以类似的方式来控制模式的相互作用。

波导渐变器、过渡器和耦合器在物理上都是通过它们的传播模式的耦合和相互作用完成的。因此,它们的分析和设

计亦要借助于这些模式的电磁场表达法。利用波导模式对电磁场作级数展开，在特定结构的边界条件下麦克斯韦方程组可以变换为耦合波方程组或广义传输线方程组。不过，麦克斯韦方程组描述的是对于电场和磁场矢量分量的有限数目的二阶偏微分方程组，而耦合波方程组或等效的广义传输线方程组，一般是由无限多的一阶耦合常微分方程所组成，每一个模有两个方程，分别对应于它的正向行波和反向行波分量。

利用波导模式将电磁场展开，以及随后将麦克斯韦方程组转换为耦合波方程组，应充分考虑到波导过渡器的边界条件及其所有的不均匀性。变换为耦合波方程组的方法有好几种，究竟采用何种方法取决于波导的类型和过渡器的不规则性。等效源法是在相当普遍的情况下都可以采用的一种方法。应用这种方法时，考虑一节无限短的包括其不规则性在内的波导过渡器。假定任一波导模式入射到这一节波导上。然后这样来安置假想的电流源和磁流源，使得入射模本身通过这一节波导传播时不与其他模发生相互作用。如果这些源是单独安置的，则不管这一节波导的不均匀性如何，入射模通过这一节波导传播，在它的出口不会激励任何其他的模。随后，再通过安排一个附加的源分布，就可以从这种假想的源回到实际的无源情况，而附加源的幅度应和假想源的幅度相等，但方向相反。这些附加源将激励起其他正向和反向的模，一般，也包括入射模的反射在内。

因此，利用这种等效源法及其同入射模的关系，我们可以得到该入射模同所有其他模之间正向和反向的耦合，这些模式由于不规则性而同入射模相互作用。等效源法的应用很普遍，它对于不规则性程度如何没有任何限制。所以本书通篇广泛应用这种方法。

先前曾采用的另一种方法^[2]是从适当的波导作为参考结

构,以它的简正模把电磁场作级数展开出发,把不规则波导的麦克斯韦方程组变换为广义传输线方程组。然后,通过对麦克斯韦方程组所表示的一个有限的二阶偏微分方程组进行分部积分,对于简正模的电场和磁场的幅度或对于它们正向和反向行波的幅度,得到一组无限多个一阶常微分方程。由分部积分法变换为广义传输线方程组的这种方法,不是在任何情况下都可以应用,只有在对不规则性的程度有一定限制的某些情况下才是可行的。不过,在本书中,它不仅是作为除等效源法之外的另一种方法,而且在比等效源法更合适的情况下也将加以采用。

当以参考结构简正模的场来表达过渡器或耦合器的电磁场时,还必须确定沿过渡器或耦合器各处选择什么样的本地波导作为参考结构。基于一些实际的原因,我们总是利用这样的参考结构的简正模,这种参考结构在过渡器或耦合器的两端与所用的输入波导和输出波导是完全一样的。这样来选择参考系统时,我们用来表述电磁场的简正模在过渡器或耦合器的输入和输出端就成为连接波导的传播模式。过渡器或耦合器在工作情况下,通常总是由一个或最多几个模来激励,我们感兴趣的是对于给定的激励这些模式所带走的功率。

因此,只要有可能,我们总是采用与过渡器或耦合器两端相连的波导所确定的参考系统。但是,在它们的中间,我们未必有任何特定的参考波导。然而,作为一根普遍的线索,我们可以选取这样的本地参考结构,使它尽可能同过渡器的本地截面、甚至于也许还加上在传输方向上的变化率相对应。本地参考系统同波导装置越类似,由于参考系统和波导装置的偏离而引起的参考系统本地简正模之间的相互作用就越小。模式之间仅有弱耦合的耦合波方程组或广义传输线方程较易求解,其精度要比具有强耦合的方程组高。

波导渐变器的本地参考波导显然可选取柱波导，因此是一种规则波导，它的横截面以及在各处的媒质分布都跟波导过渡器的本地截面与媒质分布相同。这种参考波导的本地简正模，虽然在柱形规则结构中是彼此独立传播的，但是，由于参考结构的截面及其媒质分布是沿过渡器逐点变化的，因而在实际的过渡器中是互相耦合的。

选取这样的参考结构，使它不仅在各个位置和波导过渡器的截面相同，而且它的变化率也相同，这要比柱形参考波导更自然。

例如，对于圆波导渐变器，更自然的参考结构是一个正圆锥，它的表面在参考截面上与圆波导渐变器相切。在正圆锥波导中传播的简正模具有球面波前。在圆波导渐变器中，一旦张角发生变化，简正模就互相耦合。

从这个例子看来，并不是任何波导渐变器都存在这种比较自然的参考结构，仅对于一些具有特殊几何形状的波导渐变器才找得到。不过，从形式上总是可以从给定的本地简正模系统（如本地柱形系统的简正模），通过耦合波方程的分部积分，变换到一个更自然的系统。在由分部积分所得到的耦合波方程中，新的模在给定的参考系统中将仅仅由于耦合的变化率才彼此耦合，这些新的模的场更接近于波导过渡器中的场，相互作用更小。

沿波导过渡器和耦合器各处选取怎样的本地参考系统，或者通过分部积分变换到那一种更自然的系统，在很大程度上取决于波导的类型、过渡器及耦合器的形式、以及分析和设计的内容。

在微波电路、光导结构及其装置中，波导渐变器、过渡器和耦合器起着重要的作用。为此，关于此类器件的分析和设计已有大量文献资料可查。尤其对于各种各样的过渡器和耦

合器更是如此。对于这一类特殊结构的分析和设计，已发展了好多种专门的方法。本书不可能把它们全部包罗在内，我们认为还是对过渡器和耦合器一些基本的并带有普遍性的理论问题作一介绍，并为此特别仔细地选择一些典型的例子加以说明来得好一点。

因此，我们在引论中所列出的参考文献只选取了对波导渐变器、过渡器和耦合器的现况有过重大贡献的一部分资料。

在这类结构中，对波的传播和耦合问题的一种极有效的分析方法是基于广义传输线方程组或耦合波方程组的概念。这个概念由谢昆诺夫 (Schellkunoff)^[1] 首先提出并仔细研究过。莱特 (Reiter)^[2] 和卡赞涅林巴乌姆 (Каценеленбаум)^[3] 对发展这个方法也作出了重大贡献，索列玛 (Solymar)^[4] 则推导出简化的但仍很通用的关于这些方程中的耦合波表达式。

许多作者利用这种耦合波方程组的方法分析了各种不规则波导结构。至于弯曲波导结构的分析，可在参考文献[5]中找到完整的资料目录。

克劳芬斯坦 (Klopfenstein)^[6] 和柯林 (Collin)^[7] 对于反射最小的渐变 TEM 传输线首先提出了改进的和优化的设计。还曾分析和设计了过模圆波导之间和矩形波导之间模式变换低的渐变器^[8, 9]，其中只考虑一个耦合最强的杂模，并假定两个模都远高于截止值。赫肯 (Hecken)^[10, 11] 进一步改进了设计，他实际上获得了最优化的波导渐变器。

希内兹莱 (Schnetzler)^[12] 首先研究了在不规则波导中近截止区内波的传播和反射，其后汤 (Tang)^[13] 对此作了更详细的研究。汤还应用这个现象，通过在截止区的适当的渐变波导，设计了波导高通滤波器^[14]。辛肯 (Hinken) 则研制了一种可调波导高通滤波器而改进了这一设计^[15]。

在一种自然坐标^[16]中分析了波在波导渐变器中的传播，有人还用喇叭中的波把场在这种自然坐标系中展开^[17]。巴哈 (Bahar)^[18] 在不同张角的两个喇叭之间的边界上使场匹配而研究了这些喇叭波的耦合。利用等效源法，或以喇叭中的波把麦克斯韦方程组变换为广义传输线方程组，也可以充分精确地确定这种耦合^[19]。

以喇叭中的波把场展开也可以用来综合改进的波导过渡器^[20, 21]。在文献[21]中还进一步证明了，以本地截面的柱形模分析一些渐变式波导过渡器最终得到的散射矩阵与用喇叭中的波分析时所得到的散射矩阵完全相同。

对于截面呈圆形和矩形的渐变式波导过渡器所用的设计方法^[7, 8]，对截面形式相差很大的过模波导之间的过渡器可能不适用。一个典型的例子是从矩形波导的基模到圆波导的 H_{01} 模之间的过渡器。对于这种过渡器的设计规则可参考文献[22]。利用大型的计算机可以分析和设计这一类过渡器以及更加复杂的过渡器结构^[23]。

在文献[24]中对于波在耦合波导中的传播及其对波导耦合器的设计应用作了综述。绝热耦合是这种耦合波理论的推广，在文献[25]中首先对此作了介绍。近来已经证明，绝热耦合器对光波导很有用，在资料[26]中对此作了精辟的分析。

金属波导之间的耦合一般是通过公共壁上的小孔完成的，贝泽 (Bethe) 对于小孔建立了一个普遍的耦合理论^[27]。对于这种小孔耦合的许多应用，本书仅引用了文献[28]，因为它扩充了文献[27]的结果，并考虑到特殊的波导和小孔的配置方法。

在许多已发表的资料中，应用各种方法分析了在平行的几根光波导以及在光波导渐变器中模式之间的耦合。在本书中，我们特别是参考了马库塞 (Marcuse) 的文献^[29]，他首先

系统地利用辐射模来考虑光波导渐变器的辐射功率。还有斯尼达 (Snyder) [30], 他严格系统地阐述了不规则光导纤维的耦合模理论。

在文献[31]中评述了对于平行光波导之间的模式耦合较有贡献的许多论著。

参 考 文 献

- [1] SCHELKUNOFF, S. A., Conversion of Maxwell's equations into generalized telegraphist's equations, *Bell. Syst. Tech. J.* **34**, 995—1043 (1955).
- [2] REITER, G., Generalized telegraphist's equation for waveguides of varying cross-section, *Proc. IEE.*, **106B**, (13), 54—57 (1959).
- [3] KATZENELNBAUM, B. C., On the theory of nonuniform waveguides with slowly changing parameters, *Congres Internatl. Circuits et Antennes Hyper-frequences*, Paris, France, October 1957.
- [4] SOLYMAR, L., Spurious mode generation in non-uniform waveguide, *IEE Trans.*, MTT-7, 379—838 (1959).
- [5] LEWIN, L., CHANG, D. C., and KNESTER, E. F., Electromagnetic waves and curved structures, Peter Peregrinus, 1977.
- [6] KLOPFENSTEIN, R. W., A transmission line taper of improved design, *Proc. IRE*, **44**, 31—35 (1956).
- [7] COLLIN, R. E., The optimum tapered transmission line matching section, *ibid.*, **44**, 539—548 (1956).
- [8] UNGER, H.-G., Circular waveguide taper of improved design, *Bell Syst. Tech. J.*, **37**, 899—912 (1958).
- [9] TANG, C. C. H., Optimization of waveguide tapers capable of multimode propagation, *IEEE Trans.*, MTT-9, 442—452 (1972).
- [10] HECKEN, R. P., A near-optimum matching section without discontinuities, *ibid.*, MTT-20, 734—739 (1972).
- [11] HECKEN, R. P., and ANUFF, A., On the optimum design of tapered waveguide transitions, *ibid.*, MTT-21, 374—380 (1973).
- [12] SCHNETZLER, K., Die Reflexion der Grundwelle an den Knickstellen eines Hohlleiters, insbesondere bei einem stetigen Übergang von einem rechteckigen auf einen runden Hohlleiter, *AEU* **14**, 177—182 (1960).
- [13] TANG, C. C. H., Mode conversion in tapered waveguides at and near cutoff, *IEEE Trans.*, MTT-14, 233—239 (1966).
- [14] TANG, C. C. H., Nonuniform waveguide high-pass filters with extremely steep cutoff, *ibid.*, MTT-12, 300—309 (1964).
- [15] HINKEN, J. H., An adjustable waveguide high-pass filter, *AEÜ*,