

现代通信译丛

# 光波导理论

[澳] A. W. 斯奈德 J. D. 洛夫著

周幼威 林志瑗 姚慧海 张一龙译



XIANDAI TONGXIN YICONG

人民邮电出版社

Optical Waveguide Theory  
Allan W. Snyder and John D. Love  
Institute of Advanced Studies  
Australian National University  
Canberra, Australia

内 容 提 要

本书是一部学术价值较高的经典著作。全书共包括三大部分：第一部分以光线追迹和经典的几何光学为基础，对多模波导中光的传输作了全面分析；第二部分以麦克斯韦方程和标量波动方程为基础，利用模式分析和格林函数方法，研究讨论了单模和少模光纤中的传输理论；第三部分则主要包括上两部分中用到的基本理论、基本公式的推导。书中附有大量实例以示范理论的应用。

本书适用于光纤通信、光电子、微波光学等专业的大学、研究生作教科书，并可作为有关专业的大学教师、科研人员和工程技术人员的参考书。

现代通信译丛

光 波 导 理 论

[澳] A. W. 斯奈德 J. D. 洛夫 著

译者：林志瑛  
姚慧海 张一龙

人民邮电出版社出版发行

北京东长安街27号

顺义向阳胶印厂印刷

新华书店总店科技发行所经销

\*

开本：850×1168 1/32 1991年6月 第一版

印张：29 4/32 页数：466 1991年6月北京第1次印刷

字数：780千字 插页：5 印数：1—2 000册

ISBN7-115-04442-2/TN.440

定价：19.80元

## 《光波导理论》中文版前言

五十年代后期，世界上至少有十多个国家，包括我国，都曾大力研究微波圆波导传输，其中研究得最多的是介质膜波导和螺旋波导。这类传输毫米波的特殊圆波导曾被认为是传送大容量、远距离通信的最理想的媒质。关于圆波导传输的技术问题，经过不到二十年的研究，基本上已经完全解决。可惜的是，除了在小范围内可用于个别场合（如迴旋管和某些系统中的中短程馈线），这种现成的技术被闲搁了起来，并未获得原来所预期的广泛的大规模应用。历史证明，这类微波圆波导已被光纤的绝对优势所压倒。

从微波到光，意味着频率的不断提高，这是电子学和应用物理学发展的一个重要趋势。光和微波一样，也是电磁波，所以光波导理论和微波传输理论有着密切的联系。然而，两者又有各自的截然不同的特点。

光波导的主要形式是光纤或介质圆波导。如果从纯理论的角度看问题，光纤不过是尺寸缩小了的微波介质圆波导。但在实际上，两者之间却存在着一些很重要的差别，其中之一就是光纤的弱导特性。实际的光纤，特别是单模光纤，其掺杂浓度都很小，使得纤芯和包层只有很小的折射率差。这个实际的特点对于光纤理论的发展具有不可估量的意义。

本书的作者之一斯奈德教授（1985年当选为澳大利亚国家科学院院士）最早在理论中引入弱导的概念，于1969年发表了他的著名论文“介质或光波导本征函数与本征值的渐近表示式”。作为边值问题求解介质波导的模式，虽然早在1910年就出现在洪德鲁斯和德拜的论文中，但从应用科学或技术科学的角度（即对于光纤技术所起的作用）来说，不能不认为斯奈德教授的论文具有开拓性的意义。

斯奈德教授还最早发表了光纤耦合模理论的论文(1972)。在微波波导理论中,传输线的概念和方法具有普遍的重要意义斯奈德教授的论文是在光纤领域中发展了这种概念和方法。除此以外,在这部专著中还包含了斯奈德教授和洛夫博士两个作者本人的许多其它原始贡献。

我和斯奈德教授于七十年代末开始书信来往和交换论文。1981年10—11月他访问了上海科技大学,作了一系列关于“光波导理论”的演讲。当时,他的这部专著的初稿基本上已经写完。他对写作这部专著专心和认真的态度,使我感到惊奇和钦佩。他经常在旅途摇动的车子中反复的思考和修改书稿。1983年,我和斯奈德教授共同组织了在我国桂林召开的国际光波导理论讨论会。这次会议对推动我国光波导技术的发展起了积极作用,同时也增进了斯奈德教授和我之间以及许多外国科学家和我国科学家之间的了解和友谊。我认识洛夫博士是在旧金山IOOC'81会议上,他的渊博学识和谦逊风度使得许多国际上的同行都对他表示称赞。

斯奈德院士和洛夫博士合著的《光波导理论》,由上海科技大学和东南大学的周幼威、林志瑗、姚慧海、张一龙四位教授译成中文本问世。我相信,这部著作中文版的出版将会对我国的光纤技术与集成光学的发展起着深远的影响。因而,我很高兴地接受了出版者的邀请,为《光波导理论》中文本写了这篇前言。

黄宏嘉

中国科学院学部委员

上海科技大学名誉校长

---

\* 本书由张一龙译第1—8章;姚慧海译第11—18章,林志瑗译第19—29章;周幼威译9、10和30—37章并校订全书。

# 著 者 序 言

本书旨在对光波导理论作一深入而自成体系的论述。我们力图突出基本物理过程，着重概念，并与物理直觉相对应，进行数学分析。书中的补充章节，既可弥补数学资料的不足之处，又可提供前后一致和严格的数学处理方法。为了有助于理解，每一章都集中讨论一个概念，所以章节比较短。书中附有一百五十多个有完整解答的例题，用来示范理论的应用。由于讨论的处理方法简单和附有大量例题，所以大学本科生也可参考本书。许多基本课题都是首次在这里讨论，而且更重要的是，我们把材料集中起来，用最简单的方法对基本概念作统一的处理。为了使讨论的课题达到比较成熟的阶段，因此我们有意拖长了成书的时间，持续达十年之久。

## 材料编排

本书分为三部分。第一篇介绍分析多模光波导传播所需的几何方法和基本光线方法。第二篇讨论电磁理论法，着重于只传播一个模式或少数几个模式的波导。对于这些波导，第一篇的方法是不精确的。第三篇则提供了数学方面的补充章节，主要用来充实和增强第一、二篇中较偏重于物理图象的讨论。可以不看第一篇就看第二篇，但我们并不主张这样做。此外，虽然并不需按顺序阅读各章，但最好熟悉一下每章的主题。在第一和第二篇的引言里都有关于每章主题以及其它方面的内容，以帮助读者掌握。

## 参考文献

所引用的文献都是那些我们最熟悉的并对理解所讨论课题有所帮助的。虽然我们并未试图称赞每一个作出贡献的人，但我们也尽

量引用那些给光波导理论带来新的重要方法的原始论文。

### 关于教学的意见

由于我们的主要目的是作广泛的论述，为了完整性，我们特意按照最合乎逻辑的次序来展开各章节。因此，如果读者心目中只对某些局限的内容感兴趣，那就不需阅读每一章。为此我们在全书每部分都有给读者的建议。特别是第一次阅读这方面的内容时，可只选阅那些为了掌握基本概念而必需阅读的章节。例如对于为期10周，共30学时的短期课程来说，我们建议主要阅读第一篇中的第1,3,5,6和第10章，第二篇中的第11,12,13,14,15,19和第20章。按这个计划，略去的主要是关于辐射损耗的内容。

### 致谢

我们对许多人士深表谢意。我们的同事和密切的合作者C. Pask博士在各个方面提出了许多有益的意见。A. Ankiewicz博士完成了复核书中的分析这一重任。这些年来，我们的许多研究生通过他们的探索精神和批判意见，以及他们自己有价值的研究，对本书作出了重大贡献。我们特别感谢K. F. Barrell, M. C. Campbell, D. J. Carpenter, C. D. Hussey, P. D. McIntyre, R. A. Sammut, I. A. White, C. Winkler和W. R. Young等各位博士以及我们现在的学生R. J. Black, F. Ruhl和I. Skinner。最终文稿的打字是由Diana Alex小姐和Pauline Wallace夫人完成的，插图是Sandra Smith夫人所绘。

# 目 录

## 第一篇 多模光波导的光线理论分析

引言	1
第一章 平面波导中束缚光线	5
第二章 光纤中的束缚光线	29
第三章 脉冲展宽	59
第四章 光纤照射和脉冲形状	74
第五章 非均匀光纤	109
第六章 材料吸收	151
第七章 泄漏光线	169
第八章 空间瞬态	193
第九章 弯曲	224
第十章 衍射现象	235

## 第二篇 光波导的电磁分析法

引 言	251
第十一章 模式的基本性质	255
第十二章 具有精确解的波导	292
第十三章 弱导波导	335
第十四章 圆光纤	359
第十五章 圆光纤的高斯近似	401
第十六章 非圆形光波导	423
第十七章 非圆形光纤的高斯近似	438
第十八章 微扰光纤的模式	449
第十九章 缓变波导	491

第二十章	照射, 倾斜和偏移	508
第二十一章	光纤内的源	536
第二十二章	非均匀光纤	559
第二十三章	弯曲	577
第二十四章	泄漏模式	593
第二十五章	辐射模式	625
第二十六章	辐射场的分解	649
第二十七章	模式耦合	658
第二十八章	局部模式耦合	673
第二十九章	串音	690

### 第三篇 补充材料

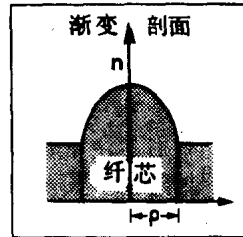
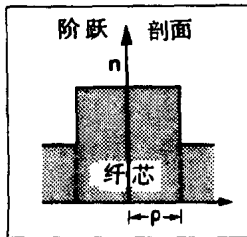
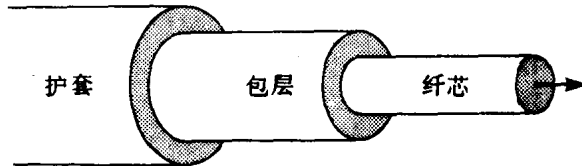
引 言		714
第三十章	麦克斯韦方程组	715
第三十一章	用于麦克斯韦方程的模式法	731
第三十二章	弱导近似	761
第三十三章	用于标量波动方程的模式法	785
第三十四章	格林函数法	809
第三十五章	光线与局部平面波	823
第三十六章	光线与渐近模式方法	858
第三十七章	数学公式	882
索引		904
符号表(1)	电磁量	922
符号表(2)	光线参量	922
符号表(3)	波导参量或光纤参量	923
符号表(4)	模式参量	924



# 第一篇 多模光波导的 光线理论分析

## 引 言

光波导是一种传送能量的介质结构，所传能量的波长位于电磁



多模光纤	单模光纤
$12.5 \mu\text{m} < \rho < 100 \mu\text{m}$	$2 \mu\text{m} < \rho < 5 \mu\text{m}$
$0.8 \mu\text{m} < \lambda < 1.6 \mu\text{m}$	$0.8 \mu\text{m} < \lambda < 1.6 \mu\text{m}$
$0.01 < \Delta < 0.03$	$0.003 < \Delta < 0.01$

图 I-1 典型光纤的术语、折射率分布和尺寸范围。 $\rho$  为纤芯半径， $\lambda$  为自由空间光波长， $\Delta = (1 - n_c^2 / n_o^2) / 2 [1]$ 。

频谱的红外区域和可见光区域。实际上，用于光通信的波导是非常柔韧的光纤，它由近乎透明的介质材料所组成。光纤很细——与人的头发丝差不多，一般可分为三层，如图 I-1 所示。中间是纤芯，外面有包层包着，再外面有一护套围住。纤芯内，折射率分布剖面<sup>\*</sup>  $n$  可以是均匀的或者是渐变的，而包层折射率分布一般都是均匀的。这两种情况分别对应于图 I-1 中的阶跃折射率分布剖面 and 渐变折射率分布剖面。波导能导波的必要条件是纤芯折射率（至少在截面的某些区域）大于包层折射率。在多数应用场合，大部分光能在纤芯中传输，而只有一小部分在包层。护套在光学上几乎与纤芯隔绝，因此，我们通常忽略其影响，并且假定包层边界在无限远，而使分析简化。

## 多模和单模波导

光波导又可方便地分为两类：多模波导（纤芯较大）和单模波导（纤芯较小）。这两类波导的区别将在 10-3 节和十一、十二章中讨论。多模波导满足  $(2\pi\rho/\lambda)(n_{c0}^2 - n_{c1}^2)^{1/2} \gg 1$  这一条件，其中  $\rho$  是纤芯线度（例如光纤纤芯半径）， $\lambda$  是自由空间光波长， $n_{c0}$  是纤芯中的最大折射率， $n_{c1}$  是包层的均匀折射率。多模波导是第一篇的主题，而第二篇则更注重单模和少模波导。目前用于远距离通信的光纤，其尺寸范围列于图 I-1<sup>[1]</sup>。这些光纤的结构，读者可参考其他书籍<sup>[2,3]</sup>。

## 光线追迹

沿光波导的电磁传输可严格地用麦克斯韦方程描述。然而，众所周知，如果在某些区域内，折射率在与光波长可比拟的范围内只有很小的变化，那末可用经典几何光学来近似描述光的传输。用于通信的多模光波导一般都符合这个条件。因此，描述多模光波导中

<sup>\*</sup> 原文为“refractive index profile”在本书中分别译为“折射率分布剖面”，“折射率分布”和简称“剖面”。

光的传输，最直接而概念上又最简单的方法是在纤芯内进行光线追迹。这样，本书的前五章只进行经典几何光学分析。对于把麦克斯韦方程的解归结为经典几何光学这一点感兴趣的读者，可参考第三十五章的开始部分。

## 波动效应

采用经典几何光学，我们就忽略了所有波动效应。多模波导中，波动效应通常是可忽略的，如第十章所述。但是也有例外，如这种效应随光的行进距离指数积累时，由于波动效应在长波导中会产生显著的影响，则波动效应就必须保留。例如辐射损耗、包层吸收损耗和弯曲引起的辐射损耗等。这些将在第六章至第九章中讨论。我们还将进一步考虑光的局部平面波性质，而对经典几何光学描述予以修正。

## 模式传输

在多模波导中的传输还有另一种描述方法，即以光波导电磁模式的短波长极限为基础的方法。虽然这方法所得结果与经典几何光学完全相同，但要作一些不必要的代数运算，并且还要具备有关模式理论的知识。这种方法将在后面第三十六章中作概略介绍，并把它作为一个例子，说明在短波长极限时，用麦克斯韦方程怎样导致第一篇的结果。

## 脉冲展宽

远距离通信光纤在实用中最令人关注的现象是沿光纤传输时脉冲的展宽。理想化的多模光纤，脉冲展宽很容易用经典几何光学予以描述，如第三章所述。如果仅着眼于脉冲展宽，那末有第三章的全部内容再加上第一章的几个结论就足够了。然而，由于第一篇是为光波导的几何光学方法打基础的，因此，其意义更为深远，使我们在实际条件偏离希望的理想条件时，能更充分地认识所引起的后

# 第一章 平面波导中束缚光线

## 1-1 平面波导

### 阶跃剖面平面波导

#### 1-2 光线路径的构画

#### 1-3 光线不变量

#### 1-4 光线路径参数

#### 1-5 光线渡越时间

### 渐变型剖面平面波导

#### 1-6 光线路径的构画

#### 1-7 光线不变量

#### 1-8 光线路径参量

#### 1-9 光线渡越时间

### 弱导波导

#### 1-10 旁轴近似

### 具有解析解的渐变剖面

#### 1-11 例：抛物型剖面

#### 1-12 例：双曲正弦型剖面

#### 1-13 例：有包层的方次律剖面

### 不对称波导

### 参考文献

我们从平面或平板波导着手对多模光波导作光线分析。就说明其原理而言，这种波导是最简单的介质结构并被应用于集成光学。由于我们可以通过光线路径叠加的方式分析波导中的光传输特性，因此，彻底搞清每一射线的性质是十分重要的。本章中，我们研究平面波导内的光线轨迹，着重于在波导中没有能量损耗因而可传输

到无限远的那些光线——束缚光线。

## 1-1 平面波导

平面或平板波导示于图1-1。其典型结构是厚度为  $2\rho$  的芯层夹在两层包层中间。如引言部分所述，为简单起见，假定包层边界是无限的。 $x = \pm \rho$  平面是芯层与包层的交界面。由于波导在垂直于  $x$  轴的所有方向上无限延伸，所以问题是二维的。 $z$  轴位于二个芯层——包层界面的中线。图1-1中，芯层折射率横向分布  $n(x)$  可以是均匀的或者是渐变的，并假定包层折射率  $n_{cl}$  为常数。为了使波导具有导波特性和，芯层折射率必须比  $n_{cl}$  大。本章中我们进一步假定分布剖面不随  $z$  变化，因此，波导是平移不变的或柱对称的。

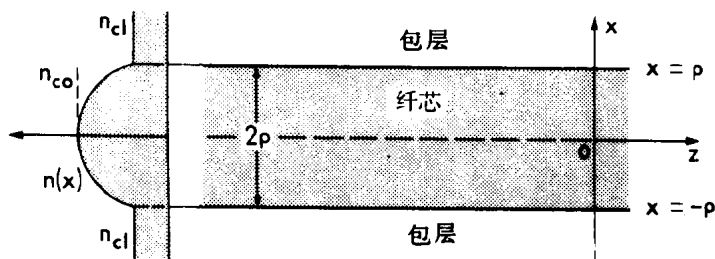


图 1-1 描述平面波导的术语和坐标系。图中为一有代表性的渐变剖面，折射率在芯层中是变化的，在包层中是均匀的，且假定包层边界无限

图1-1定义的参数可与沿波导传输的光的自由空间波长  $\lambda$  结合起来形成一个无量纲参数  $V$ ，这就是通常所说的波导参量或波导频率。若  $n_{co}$  是  $n(x)$  的最大值(并不一定是在轴上的数值  $n(0)$ )，我们定义

$$V = \frac{2\pi\rho}{\lambda} (n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{1/2} \quad (1-1)$$

$V$  的其它表示形式示于书末符号表。这里所讲述的光线理论只适用于多模波导，也就是满足  $V \gg 1$  的波导，其原因在第十章和第三十六章中讨论。

### 阶跃剖面平面波导

参照图1-2，阶跃折射率平面波导的折射率剖面为

$$\begin{aligned} n(x) &= n_{co}, & -\rho < x < \rho; \\ n(x) &= n_{cl}, & |x| > \rho \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中  $n_{co}$  和  $n_{cl}$  是常数，且  $n_{co} > n_{cl}$ 。

现在我们说明怎样用光线追迹法和斯涅耳定律来确定芯层中的光线路径。最重要的问题之一是决定一条光线成为束缚光线（即沿着无吸收的波导进行无功率损耗传输的光线）的必要条件。

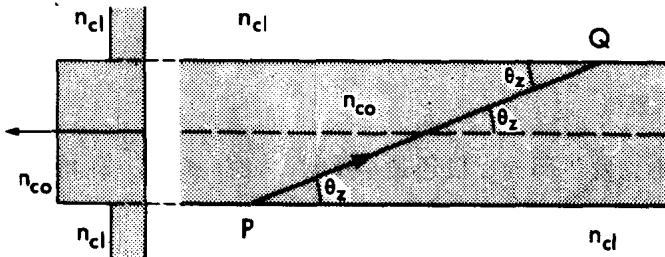


图 1-2 阶跃剖面平面波导芯层中，界面之间光沿直线传输。

### 1-2 光线路径的构画

在图1-2所示的阶跃折射率波导的芯层内，光是沿直线传输的。若一光线发源于交界面的  $P$ ，与波导轴的夹角为  $\theta_z$ ，在相对交界面上它将到达  $Q$  点，如图所示。在  $Q$  点处的情况等效于折射率为  $n_{co}$  和

$n_{cl}$  的两个半空间的界面处的入射，如图1-3所示。这时，反射受斯涅尔定律支配[1,2]。通常这些定律以与法线  $QN$  所夹的角度表示，如35-2节所述。但我们宁愿用它们的余角  $\theta_z$  表示。这样选择的理由，在第二章中当把光纤中的光线归类时就显而易见了。用余角表示时，在  $Q$  点的入射光线，当  $0 \leq \theta_z < \theta_c$ ，发生全内反射；当  $\theta_c < \theta_z \leq \pi/2$ ，则部分反射，部分折射。这里  $\theta_c$  是临界角的余角，定义为

$$\theta_c = \cos^{-1} \left\{ \frac{n_{cl}}{n_{co}} \right\} = \sin^{-1} \left\{ 1 - \frac{n_{cl}^2}{n_{co}^2} \right\}^{1/2} \quad (1-3)$$

第一种情况示于图1-3(a)，反射光线以与入射光线相同的角度  $\theta_z$  离开界面。第二种情况示于图1-3(b)，表明射线分了叉，一部分以  $\theta_z$  角度反射，一部分与界面夹角为  $\theta_t$  射入包层，并满足斯涅耳定律

$$n_{co} \cos \theta_z = n_{cl} \cos \theta_t \quad (1-4)$$

只有在全内反射时，全部功率折回，也就是说，能量沿着光线流动，返回到芯层介质中。

### 光线径迹

不论发生部分反射还是全反射，光线都是以  $\theta_z$  角折回到芯层。

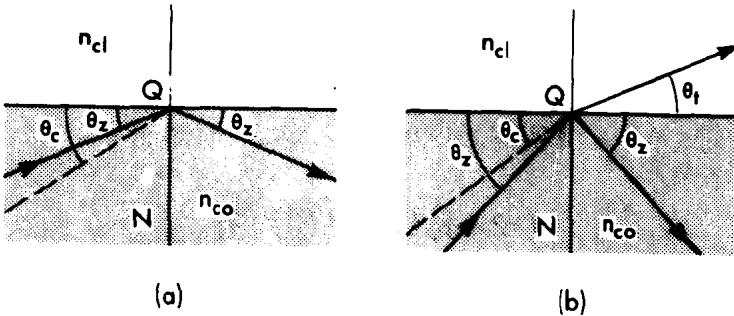


图 1-3 折射率为  $n_{co}$  和  $n_{cl}$  的非束缚区域平面界面间的反射  
(a) 全内反射 (b) 部分反射和折射

若重复上述步骤,即在相继的各次界面反射,就可构画出图1-4所示的锯齿形路径,或称为径迹。路径(a)相应于每次均是全反射的情况。我们把这种光线称为束缚光线,因为其路径全部被限制在芯层内。路径(b)相应于每次为部分反射时的情况。我们把这种光线称为折射光线。根据 $\theta_z$ 值可以把光线分类为

束缚光线: $0 \leq \theta_z < \theta_c,$	(1-5 a)
折射光线: $\theta_c \leq \theta_z \leq \pi/2$	(1-5 b)

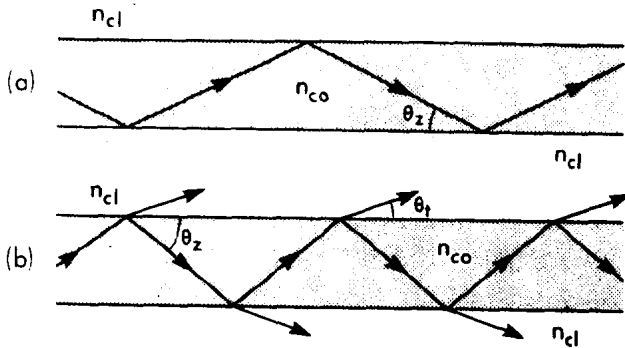


图 1-4 阶跃剖面平面波导纤芯内光线的锯齿路径  
(a) 束缚光线 (b) 折射光线

由于束缚光线的功率每次反射时都全部折回至芯层,因此,束缚光线能够无限地传输而没有任何功率损耗。折射光线在其每次反射时,要损失一部分能量,因此,传输时有衰减。这将在第七章中进一步论述。

### 1-3 光线不变量

图1-4中光线路径呈现周期性是波导平移不变性的必然结果,由此引出一光线不变量 $\bar{\beta}$ ,它沿路径各处保持不变,并规定了横截面内任意位置处光线的方向。对阶跃剖面波导,不变性由式(1-4)表示,所以我们取



$$\bar{\beta} = n_{co} \cos \theta_z = n_{cl} \cos \theta_t \quad (1-6)$$

对阶跃型剖面而言, 这是没有多大意义的, 也无特别的好处, 但是对渐变型剖面来说, 引入光线不变量可简化光线路径的描述, 如1-7节所述。光线不变量和传输方向间的关系使我们能够按照其 $\bar{\beta}$ 值将射线归类。由式(1-5) 可得

束缚光线: $n_{cl} < \bar{\beta} \leq n_{co}$ , 折射光线: $0 \leq \bar{\beta} < n_{cl}$	(1-7a) (1-7b)
---	------------------

上式归纳了波导内的全部光线。

### 1-4 光线路径参数

引入表征光线传输的参数是很有用的, 因为就是这些参数起着重要作用的, 而不是光线路径的空间关系。与前节的光线不变量一起, 这些参数常常用于后继各章中。一旦 $\theta_z$ 角确定, 图1-5中的光线径迹也就完全确定了。我们定义路径长度 $L_p$ 为相邻两次反射间的距离 $PQ$ , 这在第六章的吸收问题中是有用的。由几何关系

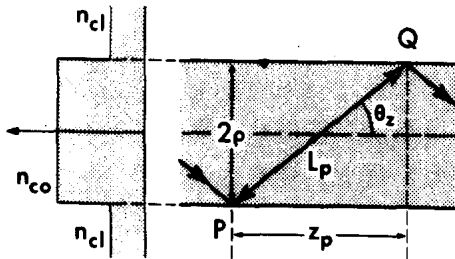


图 1-5 阶跃剖面平面波导芯层中, 光线的路径长度 $L_p$ 和光线半周期 $Z_p$

$$L_p = \frac{2\rho}{\sin \theta_z} = \frac{2\rho n_{co}}{(n_{co}^2 - \beta^2)^{1/2}} \quad (1-8)$$

式中 $\bar{\beta}$ 由式(1-6)定出。在下面讨论光线渡越时间时, 要求出光程长