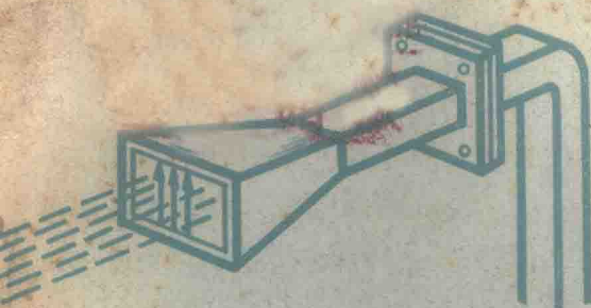
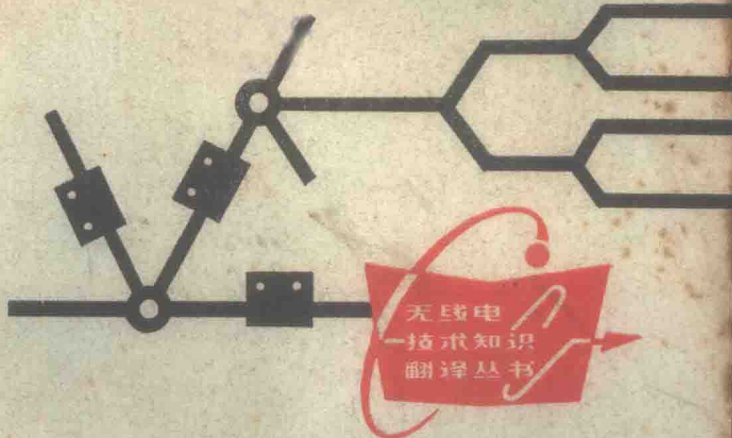


苏联 Т. И. 依久莫娃 В. Т. 斯維里多夫著 · 謝怀彦 譯



空心波导与带状波导

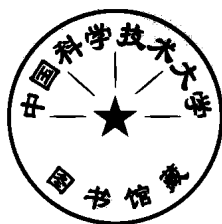


无线电
技术知识
翻译丛书

人民邮电出版社

空心波导与带状波导

苏联 T. И. 依久莫娃 著
B. T. 斯維里多夫
謝 怀 彦 譯



人民邮电出版社

Т. И. ИЗЮМОВА В Т. СВИРИДОВ
ПОЛЫЕ И ЛЕНТОЧНЫЕ РАДИОВОЛНОВОДЫ
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

1960

内 容 提 要

本书叙述微波传输线的发展简史，电磁波在波导中传播的特点，列举了波导传输线的结构参数，指出了它们的使用范围。书中介绍了带状波导的计算和设计，以及如何用带状波导制作微波装置的元件和部件。

本书可供无线电系师生、微波通信人员和无线电爱好者阅读。

空 心 波 导 与 带 状 波 导

著 者：苏联 Т. И. 依久莫娃 В. Т. 斯維里多夫

譯 者：謝 怀 彦

出版者：人 民 邮 电 出 版 社

北 京 东 四 条 13 号

(北京市书刊出版业营业许可出字第〇四八号)

印刷者：北 京 市 印 刷 一 厂

发行者：新 华 书 店

开本 787×1092 1/32

印张 2 20/32 页次 42

印刷字数 60,000 字

1963 年 9 月北京第一版

1963 年 9 月北京第一次印刷

印数 1—4 700 册

统一书号：15045·总1355—无406

定价：(9) 0 32 元

目 录

引 言.....	1
第一章 矩形波导和圆形波导	6
1. 波导内的波和场.....	6
2. 电磁波在波导内的传播特点.....	14
3. 波导尺寸的选择.....	19
4. 波导的激励和波导与其它电路的耦合.....	22
5. 利用波导的几个例子.....	26
6. 波导系统的元件.....	31
第二章 带状无綫电波导	44
7. 带状波导的基本特性和电磁波传播.....	45
8. 用带状波导制成的元件和部件.....	56
9. 带状波导电路的制作.....	77
結 語.....	80
参考文献	82

引 言

在無線电电子学发展史上清楚地表明着縮短波长的趋势。就以雷达为例，在最近 15—20 年間，从应用米波和分米波到应用厘米波，甚至应用毫米波。在一切通信的发展中也可以看出是在力图縮短波长。一般說来，在厘米波段能同时傳輸千百路电话或几个电视节目。在波导通信线路中应用毫米波，就有取之不尽的潜力。

超短波被区分成米波（10—1米），分米波（10—1分米），厘米波（10—1 厘米）和毫米波（10—1 毫米）。比 1 毫米更短的無線电波称为亚毫米波。超短波段所对应的频率是 30 兆赫—3,000 千兆赫。而 1 千兆赫（Ггц 或 GG）等于 1000 兆赫或 10^9 赫。

微波波段（或特高频）对应于 1 千兆赫以上的频率（波长短于 30 厘米）。微波波段（或特高频）的长波界限是假定的。但是，即使在接近 30 厘米的波长上，就已经出现低频無線电技术和超高频技术的許多概念上的区别了。例如在微波波段，便要放弃那些無線电爱好者所习惯的电容器的集总电容和线圈的集总电感的概念，而必须熟悉空腔谐振器那样的回路和新型的振盪管和放大管等等。

傳輸綫在微波波段有它本质上的特征。自然，絕不是說，在波长大于 30 厘米的波段上就不能应用象波导管这类傳輸綫。但是 60 厘米左右的波所用的波导管尺寸为 45×23 厘米，这对实用來說就显得太庞大；而当波长为 15 厘米时，一般無線电回路又有如此大的輻射損失，使得不象谐振元件而象天綫。

广义地說，凡是电磁波能沿着它傳播的各種各樣的傳輸

綫，都属于无綫电波导这一大类。这里有双导綫明綫(图1,*a*)，同軸綫(图1,*б*)和各种横截面的空心金属管(图1,*в*)。由介电系数很高的介质棒做成的介质波导(图1,*г*)，以及所謂带状(板状)的对称或非对称傳輸綫(图1,*д*)也都属于无綫电波导。

在微波波段应用明綫和同軸綫会受到許多限制。这是由于随着波长的縮短，双导綫明綫間的距离必須减小以降低輻射損失。但这时也就增加了沿綫傳輸大功率时出現电击穿的危险。因此，在分米波段不宜用沒有屏蔽的对称双导綫；它一般

应用在长于2—5米的波长上。

同軸綫是屏蔽綫，較适宜应用在微波波段。但是，随着頻率上升，金属导体(特别是內导体)和介质(用来固定內导体)中的損耗增加。此外，当波长縮短时，正象双导綫中一样，必須减少內导体和外导体間距离，因而限制了傳輸功率。因此，同軸綫很少用在短于8—10厘米的波长上。有时当功率很小和长度很短时，同軸綫可以应用在3厘米左右的波长上。

早在十九世紀末叶，英国物理学家瑞利已經証明在

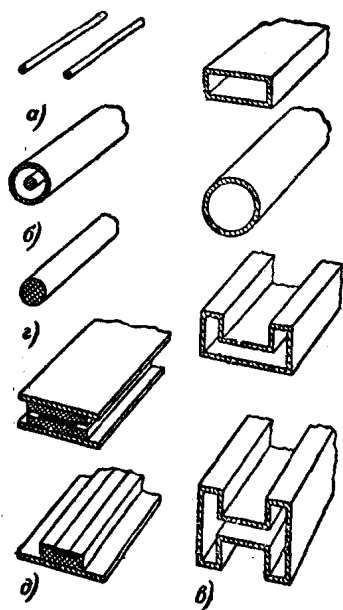


图1 各种无綫电波导

a—双导綫明綫；*б*—同軸綫；*в*—各种截面的波导管；*г*—介质波导；*д*—带状波导

空心金属管内能传播电磁能。他从数学上証明管内可以传播各种波型，并且发现存在着极限波长，称为临界波长；在尺寸和形状一定的波导内，如果电磁波的波长大于临界波长，那末这种波就不能传播。

但是，在本世紀三十年代以前还没有认真地做过檢驗瑞利的理論結果的嘗試。只有在成功地产生了厘米波电磁振盪以后，才能妥善地将波导管用于实践。特別在近十五年以来，波导管开始用得很普遍，它已經成为厘米波和毫米波的接收、发送和天綫設備中必不可少的元件。

波导管比起同軸綫和双导綫来具有很多优点。它們的特点是結構既簡單又堅固。一切电磁場都在波導管内，因此沒有双导綫明綫中的那种輻射損失。因为波导内沒有內导体，所以也沒有介质損失。同一原因，波导的电击穿强度很大。最后，波导壁上的損失也比同軸綫的損失小，因为后者的內导体上流过电流密度很大的电流。

虽然有上面指出的一些优点，但随着波长的縮短，波导管也出現了缺点。由于尺寸的减小而降低了电击穿强度，因此也就限制了傳輸功率的大小。由于集肤效应，电流在极薄的金属表面上流过，电阻增大，波导壁上的損失增加。最后，在許多情况下，通过波导的信号所占的頻帶是不够的。为了傳輸厘米和毫米波段的全部頻率，就必须用一些标准截面的波导管，并且都配有成套的測試仪器。

近年来，曾有人提出并設計了一种新型傳輸綫，称为带状或板状傳輸綫。正象图 1, δ 所示，它們是由硬介质或空气填充的两条金属带构成。虽然带状波导沒有完全屏蔽，但是輻射很小。这种傳輸綫比起波导管有更寬的頻帶，而且尺寸較小，制造很簡單。可以这样說，只要有了金属箔、带状介质材料、剪

刀和胶水便能制成带状波导。以带状波导构成的部件和电路的工业生产中可以利用设计完善的印刷电路制作工艺。

带状波导的主要缺点是不能传输大功率。但是，在毫米波段，介质填充的带状波导比起空心波导来能传输较大的脉冲功率。

在许多书籍、小册子和文献中(其中包括通俗的)，讨论了一般波导，但是在俄文文献中论述带状波导的仍然很少。因此在这本小册子中，大部分是讨论带状波导。在讨论一般波导时，着重于物理现象和实际应用中的一些具体例子。

为了了解波导内出现的过程，必须记住电磁波传播的物理过程和表征波动的基本参数。

空间中任何一点的电场变化总是伴随着交变磁场的出现，反之亦然。两个场总是同时和相伴地存在，而形成了统一的电磁场。远离辐射源的、在自由空间中传播的电磁波，它的电场和磁场的变化是同相的，即是一个场的增强对应着另一个场的增强，且它们同时达到最大值。此外，电磁波的电力线和磁力线在空间是相互垂直的。磁力线总是闭合线，而电力线不是从一种电荷到另一种电荷就是闭合线。如果空间中任何一点出现电磁振荡，那末电磁场就将从这点移动，它的移动方向是垂直于电力线和磁力线所在的平面。

运动的电磁场就形成了电磁波。电场作用在电荷上的力用电场强度来表示。电场强度是个矢量，即是有方向的量，不仅有数量值并且有一定的方向。

电场强度 E 、磁场强度 H 和电磁波运动速度 v 在空间的相对位置按右手螺旋定则决定(图 2, a)。如果螺旋按照从 E 到 H 的最短路径旋转，那末旋进方向就是电磁能传播的方向。这种电磁波称为横电磁波。它以三个字母 TEM (T 是英文

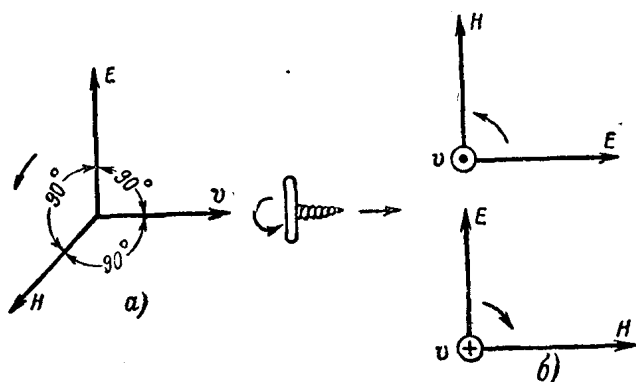


图 2 电磁波的电场强度、磁场强度和传播速度的符号

Transverse“横”字的第一个字母)来表示。TEM 波能沿着明线
和同轴线传播,也能在自由空间中远离辐射源传播。图 2 表示
用图表示场的两个方法。在第一种情况下, E 、 H 和 v 的方向
与三个直角坐标轴一致(图 2a)。在第二种情况下(图 2, b),
只有两个矢量位于图面上,而第三个矢量的方向用“ $\odot$ ”(矢量
垂直于图面并朝向读者)或用“ $\oplus$ ”(矢量背离读者)来表示。

电磁波在自由空间中的传播速度等于光速 $c = 3 \times 10^8$
米/秒,而在任意媒质中,

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}.$$

式中, ϵ 和 μ 是媒质的介电系数和导磁系数。

如果在电磁波传播的路径上遇到性质不同的媒质,那末在
这些媒质的分界面上的电场强度和磁场强度必须满足所谓边界
条件。特别是,在空气和金属的界面上,电场总是垂直于金属
表面,而磁场总是平行于金属表面。

第一章 矩形波导和圆形波导

1. 波导内的波和场

电磁波的传播及波型类别 横电磁波不可能在波导内传播。波导内没有内导体，而位于波导横断面上的闭合磁力线必须包围纵向电场。但是横电磁波却没有纵向电场。如果电场是横向的，那末它应该包围位于纵断面上的磁力线。但是横电磁波也没有纵向磁场。因此在波导内传播的是电场和磁场结构不同于横电磁波的另一种波型。

一切能在波导内传播的波型可以区分成两大类。第一类是横电波(TE)或叫 H-波，它的电场矢量 E 位于波导横断面上，而磁场矢量除了横向分量外还有纵向分量。另一类波型是横磁波(TM) 或叫 E-波，它的磁场矢量 H 位于横断面上，而电场矢量 E 除了横向分量外还有纵向分量。

波导内任何一种波型可以想象成几种波型的组合，而最简单的情况是由两个 TEM 波组成，每个 TEM 波是在与波导纵轴成 α 角的方向上传播，并且在对立的波导壁间连续反射。

让我们首先看一看当 TEM 波从金属面，即任一波导壁上反射时会发生什么现象。现在来看图 3，图中表明了投射到平面上和从这个平面反射的两个电磁波的传播途径。这个图能够帮助我们了解在实践上应用最广的 H-波在波导内的传播情形。

矢量 H 和 v 位于图面上，而矢量 E 垂直于图面。这时，电场强度矢量 E 位于图面的横向平面上，而矢量 H 既有纵向分量 H_1 ，也有横向分量 H_2 。

当倾斜入射的 TEM 波从金属表面上反射时会发生什么现象

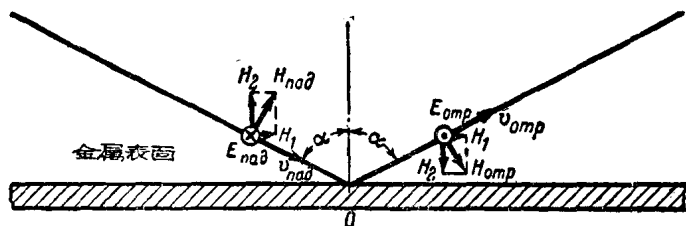


图 3 横电磁波在金属表面上的反射

象呢？为了清楚起见，反射点 0 上的入射波和反射波的矢量，在图 3 中绘在稍离 0 点的地方。

电磁波从金属表面反射的物理过程可以归结如下：投射到金属表面的电磁波在它的表面上激发起变化迅速的电流，这个电流本身就是电磁波的辐射源，正象发射天线的电流。这个电磁波也就是反射波。反射波朝完全一定的方向辐射，并且入射角(α)等于反射角(α)。同时满足边界条件。

当进一步研讨反射过程时，将不考虑由入射波激发电流所引起的金属发热的高频能量损失。这个损失一般很小。换句话说，把金属当成理想导体，即认为反射面的电阻等于零。因而，当电流沿着这个表面流过时，电压降为零（导体内所有各点的电位是相等的）。因为电力线总是连接着电位不同的两点，所以平行于金属和介质(空气)界面上电场切向分量必定为零。这就是第一个边界条件。

同理可以证明，在理想导体界面上的磁场强度必定平行于这个界面。这就是第二个边界条件。

再看图 3。在金属界面上电场强度等于零。因此 $E_{nad} = -E_{omp}$ 。负号意味着矢量 E_{nad} 和 E_{omp} 的方向相反。

垂直于金属面的磁场分量也等于零，因为入射波和反射波

的分量 H_z 的数量相等而方向却相反。但是磁場纵向分量有最大值且等于 $2H_{10}$ 。

在理想导体表面外任一点上的电場和磁場值将取决于到达这点的入射波和反射波。当这两个波在紙面的各点上相加后便得到不同的电場和磁場值(图4)。电場振幅随着离开反射面逐渐增加而达到最大值,然后减少到零,其后改变方向再增加到最大值。磁力綫形成閉合环。垂直于金属面的磁場分量在电場达到最大值时也是最大值。而磁場纵向分量在电場为零的点上达到最大值。

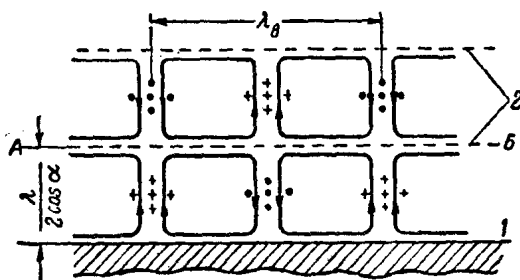


图4 平面波从金属表面反射时的电磁場图
1—金属表面; 2—零电場平面

如果我們現在把金属表面放在距反射面的第一个零电場平面上(图4的AB綫上),那末場分布不会受到破坏。这就得到了矩形波导,它的寬边 $a = \frac{\lambda}{2 \cos \alpha}$ 。另外两个波导壁平行于紙面,相隔距离 b 为小于 $\lambda/2$ 的任一值。这时边界条件不会受到破坏。

这样一来,当平面波的电場和磁場的取向如图3所示时,波导內就能传播 H 波(TE波),它是那些与波导壁成一定角度传播且受波导壁多次反射的平面波相加而成。

同理可以推广到另一种情况,这时电場位于 TEM 波傾斜

入射到反射面的平面上，而磁場垂直于这个平面（在图 3 中的矢量 E 和 H 的位置互换）。入射波和反射波相加就会得到沿着反射面传播的 E-波（TM 波）。

圓波导內也能传播电磁波，其传播的物理过程和矩形波导中的相同。

磁波（H 波）和电波（E 波）的波型有无限个，它們是按照处于矩形波导横断面寬壁和窄壁上的独立而單純的場单元数（即半駐波的个数——編者註）来区分。实际上，在所討論的磁波情况下（參看图 4），第二个波导壁可以放在距金属表面的不同距离上，只要使得：

$$a \cos \alpha = \frac{\lambda}{2} k$$

便行了，式中 k ——任意整数（1, 2, 3...）。

換句話說，沿波导寬壁可能有任意数量的場单元。可以說，在一般情況下，波导窄壁上也是如此。因此为了用字母区分波型，規定两个数字（ E_{mn} 和 H_{mn} ）。这些数字表明場沿寬壁（ m ）和窄壁（ n ）的半周期数（即半駐波数——編者）。例如，最簡單的磁波用 H_{10} 或 TE_{10} 表示。这种波在寬壁上有一个力綫圈（場在横断面上有一个最大值），而在窄壁上場沒有变化。

圓波导內也能传播各种波型。它們的符号对应于矩形波导中的符号，即是 E_{mn} 或 H_{mn} 。但是脚注 m 和 n 有不同的意义： m 表示沿圓周的場强变化周期数，而 n 表示沿波导半径的場强最大值的数目。对于圓波导中一些波型來說，由于場結構很复杂，沿半径可能是非整数半波。这时就凑成邻近的整数。

各种波导中存在的任何波型取决于許多原因，例如波导横断面的形状和尺寸，工作波长和波的激励方法等。

矩形波导中一些波型的場結構 H_{10} 波在任一瞬間的電場和磁場圖表示在圖 5 中。圖中也表示了波導壁上流過的電流。磁力綫用虛綫表示，電力綫用實綫表示。各給定點上力綫越

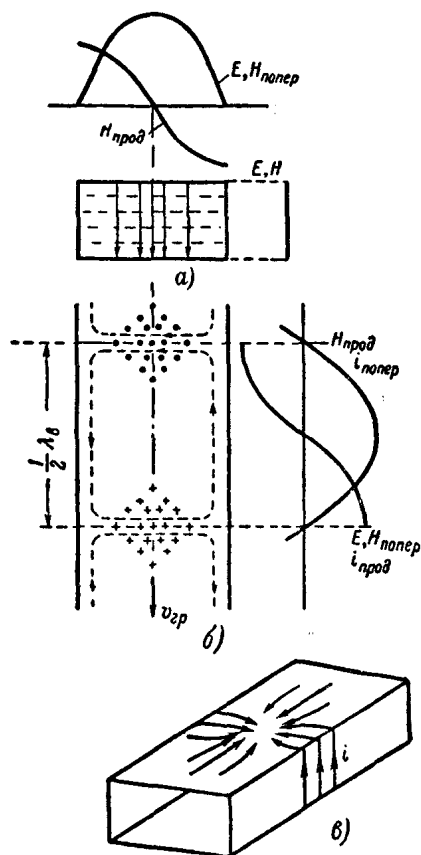


圖 5 矩形波導內 H_{10} 波的場結構
 a—波導橫斷面上；b—沿波導縱軸；c—波導內壁上的表面電流圖

密，場強就越大。雖然這種描繪場量的方法是粗略的，但仍能闡明場的基本性質和特征。例如，按照電力綫的積聚情況，能夠確定電場強度在側壁（窄壁）上等於零，而在波導中間部分（波導寬壁中心）為最大值。於是，在波導橫斷面的寬壁上有一個電場半波，而窄壁上的電場不變。

磁場的場結構更複雜，因為磁場有橫向和縱向分量。橫向磁場強度的分布特性與電場強度的分布相同。縱向磁場卻相反，在寬壁中心等於零而在窄壁上有最大值。

在波導縱軸上，縱向和橫向磁場在相位上

相差四分之一波长：纵向磁場的振幅为最大值时，横向磁場即等于零。波导軸上的电場振幅分布規律与横向磁場的变化相同。

波导內的电磁波是沿着它的軸传播。如果在波导末端沒有反射，即波所携带的全部高频功率为負載所吸收，則与一般长綫（双导綫明綫和同軸綫）相似，波导內将出现行波状态。这种状态最适合于沿波导传输能量。

当在負載上作部分反射时，传输綫的效率降低而进入波导的全部能量就不会被全部利用。原因是当在波导各段形成駐波后就会出现电流波腹，即电流密度增大，而增加了热能損失。

波导壁上各点的电流总是垂直于該点的磁力綫，而电流密度与磁場强度成正比。因为 H_{10} 波有横向和纵向磁場，电流的分布是复杂的。在寬壁的表面有横向和纵向电流，并且纵向电流的最大值位于寬壁中心綫上，就在这里呈现横向磁場最大值。在窄壁上只有横向电流，它的最大值与纵向磁場的最大值相符合。在寬壁中心，在电場改变它的方向的地方，电流綫好象中断（图5,б）。但是，这只是表面上的中断；由于有和电容器中相似的位移电流而使电流綫閉合。

为了正确的制作和应用波导管，必須知道波导內的电流分布。如对于 H_{10} 波，必須保証波导四角上有良好接触，因为这里有横向电流流过。而在波导寬壁中心却可以切出与电流綫平行的細长裂縫而不致破坏波导管的工作。

矩形波导中 H_{10} 波有最简单的場結構，称为基波。其它一切波型称为高次波。

在图6中表示了 H_{20} , H_{11} 和 E_{11} 波的場結構图。对于 H_{20} 波，沿着寬壁有两个半周期場强变化。这种場图在实质上是把 H_{10} 波的場图重复两次，但相邻場单元的相位差为 180° 。 H_{11}

波的場在窄壁上也有变化，使得波导横断面上的電場結構很复杂。 E_{11} 波的場結構比較簡單。磁場位于横断面上并且是閉合曲線，而電場在波导軸上有最大纵向分量。这是最简单的 E 波型。在矩形波导中， E_{01} 波和 E_{10} 波是不会存在的，因为这些波的磁力綫似乎應該垂直于波导壁，但是已經証明这是不可能的。

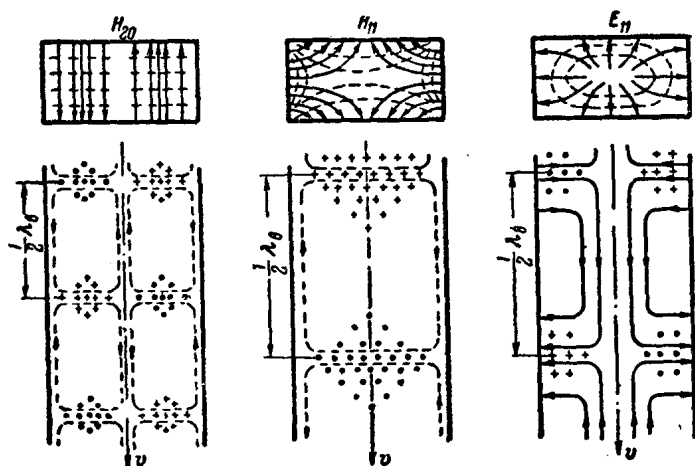


图 6 矩形波导中 H_{20} , H_{11} 和 E_{11} 波的場

对于横磁波來說，波导壁上只流过纵向电流。因此，不要求波导横断面四角上有良好接触。在这种情况下，波导管可以用四块金属板制成，在連接处不需要焊接，只要在許多点上夹牢使得結構坚固。

圓波导內一些波型的場結構 在图 7 中表示了矩形波导中的 H_{10} 波和 E_{11} 波的場图怎样先变成椭圆断面再变成圓断面的过程。矩形波导中的 H_{10} 波和 E_{11} 波对应于圓波导中的 H_{11} 波和 E_{01} 波的場結構。因此，对于圓波导來說， H_{11} 波是基波。

应当注意，对于 E_{01} 波，这里有圆对称场。对于其它 E 波来说，波导壁上的电流只是在纵向上流动。

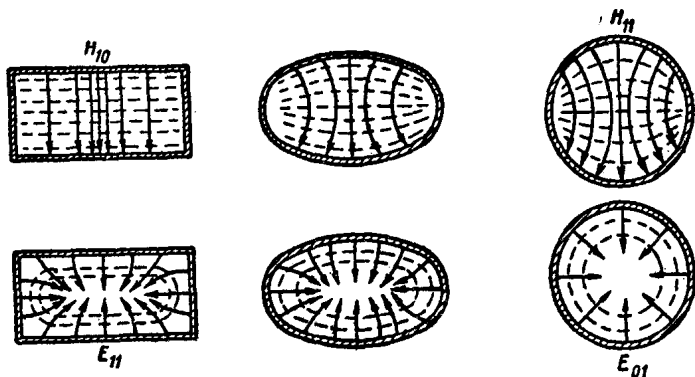


图 7 矩形波导中 H_{10} 和 E_{11} 波的场图在横断面形状改变时的变化

对于实际应用的圆波导来说， H_{01} 波有重要意义，它的场结构图表示在图 8 中。它的电力线是位于横断面上的同心圆。磁力线呈环状，沿着波导而位于波导轴的两边。这种波的突出特点就是在波导壁上只有环行电流。这个性质，正象以后所表明的，有很大价值，因为当信号频率上升时，波的衰减减小。

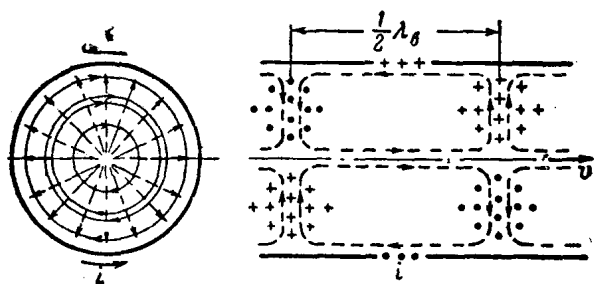


图 8 圆波导中 H_{01} 波的场结构
 i —波导壁上环行电流的方向