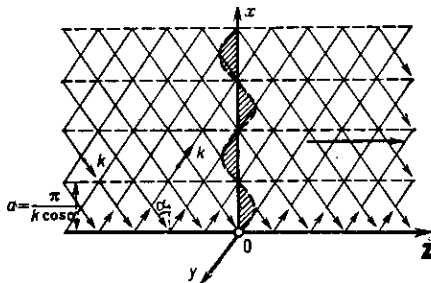


Эти потери растут с частотой; напр., для полиэтилена ($\epsilon' = 2,5$; $\text{tg } \delta = 2 \cdot 10^{-4}$) в В. д. круглого сечения радиуса 1 см затухание дипольной волны равно 0,4 дБ/м на частоте 15 ГГц, 0,6 дБ/м на частоте 20 ГГц и 0,9 дБ/м на частоте 30 ГГц. Во-вторых, к затуханию приводит рассеяние волноводной моды на неоднородностях (мелких шероховатостях, плавных изгибах границ и т. п.). Этот процесс фактически сводится к трансформации «рабочей» волны в другие моды, в т. ч. и в нелокализованные, т. е. в т. п. утекающие волны, фазовые скорости к-рых больше скорости света в окружающей В. д. среде, они способны терять энергию по типу черенковского излучения. Поэтому при разработке технологии изготовления В. д. особые требования предъявляют к получению однородных диэлектрич. нитей, стержней и т. п.; современные В. д. оптич. диапазона (световоды) способны передавать сигналы на расстояния в неск. десятков км.

Лит.: Шевченко В. В., Плавные переходы в открытых волноводах, М., 1969; Взятыешев В. Ф., Диэлектрические волноводы, М., 1970; Нефедов Е. И., Фиалковский А. Т., Полосковые линии передачи, 2 изд., М., 1980; Унгер Х.-Г., Планарные и волоконные оптические волноводы, пер. с англ., М., 1980. М. А. Миллер, А. И. Смирнов.

ВОЛНОВОД МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ — цилиндр или изогнутая труба, внутри к-рой могут распространяться эл.-магн. волны. Чаще всего используют В. м. прямоугольных и круговых сечений (прямоугольные и круглые волноводы). Возможность существования волн внутри металлич. трубы была теоретически установлена Рэлеем (Дж. У. Стреттом) (Rayleigh, J. W. Strutt) ещё в кон. 19 в. Широкое развитие волноводной техники связано с освоением сантиметрового диапазона волн в кон. 30-х гг. 20 в. В настоящее время В. м. применяют также и для волн дециметрового и миллиметрового диапазонов. Механизм распространения волн в В. м. обусловлен их многократным отражением от стенок. Пусть плоская волна падает в вакууме на идеальную отражающую металлическую плоскость $x=0$ (рис. 1), причём электрическое поле E волны параллельно этой плоскости. Суперпозиция падающей и отражённой

Рис. 1. Падение плоской однородной волны на идеально отражающую поверхность $x=0$; затрихованная область — изменение амплитуды поля E_y вдоль оси Ox ; в узлах этого поля можно помещать идеально проводящий лист, не внося искажений.



волн образует плоскую неоднородную волну, бегущую вдоль оси Oz , и стоячую волну вдоль оси Ox : $\exp(i\omega t - ik_z z) \sin(k_x x)$. Здесь k_x и k_z — проекции нового вектора k на оси Ox и Oz , ω — частота волны. Узлы стоячей волны (плоскости, на к-рых $E_y=0$) расположены на расстояниях $x = n\lambda/2$ ($n=0, 1, 2, 3, \dots$). В них можно помещать идеально проводящие тонкие металлич. листы, не искажая поле. Подобными листами можно ограничить систему с боков, перпендикулярно линиям E_y . Т. о. удаётся построить распределение эл.-магн. поля для волны, распространяющейся внутри трубы прямоугольного сечения (прямоугольный В. м.). Построение поля путём многократного отражения плоских волн от стенок, поясняющее механизм его распространения в В. м., наз. концепцией Бриллюэна.

Распространение волн в В. м. возможно только при наклонном падении волны на стенки В. м. ($\alpha = \arctg(k_z/k_x) \neq 0$). При нормальном падении ($\alpha=0$), $k_z=0$, поле перестаёт зависеть от z и волна оказывается как бы запертой между двумя плоскостями. В результате в В. м. образуются нормальные колебания, частоты к-рых ω_n определяются числом полуволен n , укладываемых

между металлич. плоскостями: $\omega_n = cn\pi d^{-1}$ (c — скорость света в вакууме, d — расстояние между плоскостями). Эти частоты наз. критическими частотами В. м. Ниж. критич. частота $\omega_{кр} = \pi c d^{-1}$ соответствует $n=1$. Внутри В. м. могут распространяться волны только с частотами $\omega > \omega_{кр}$, или $\lambda < \lambda_{кр} \sim 2d$. Длина волны в В. м. (периодичность поля вдоль оси Oz): $\Lambda = \lambda [1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2]^{-1/2}$. При $\lambda < \lambda_{кр}$ $\Lambda > \lambda$, при $\lambda \rightarrow \lambda_{кр}$ $\Lambda \rightarrow \infty$. Это означает, что при $\lambda = \lambda_{кр}$ поле в В. м. имеет не волновой, а колебат. характер. При $\lambda > \lambda_{кр}$ волна в В. м. затухает.

Поэтому для передачи сигналов длинноволнового диапазона В. м. оказываются слишком громоздкими: их применяют обычно для $\lambda < 10-20$ см. В технике СВЧ используют каналы разл. сечений (рис. 2). Обычно к В. м. относят только каналы с односвязными сечениями; каналы с двух- или многосвязными сечениями относят к линиям передачи, хотя они являются разновидностями В. м.

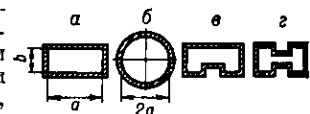
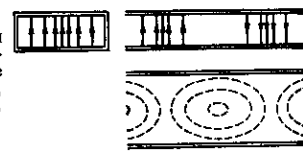


Рис. 2. Формы поперечного сечения некоторых металлических волноводов.

Волноводные моды (волноводные волны). В В. м. могут возбуждаться разл. типы волн, отличающиеся структурой эл.-магн. поля и частотой (моды). Волноводные моды находят из решения Максвелла уравнений при соответствующих граничных условиях (для идеальных проводников равенство нулю тангенциальной составляющей электрич. поля). Поперечная структура полей в В. м. определяется скалярной ф-цией $\phi(x, y)$, удовлетворяющей ур-нию идеальной мембраны с закрепленными ($\phi|_S=0$) или свободными ($\partial\phi/\partial n|_S=0$, n — нормаль к границе S) краями в зависимости от типа поляризации эл.-магн. поля. Задача о собств. колебаниях мембраны имеет бесконечное, но счётное множество решений, соответствующих дискретному набору действительных собств. частот. Каждое из этих собств. колебаний соответствует либо нормальной волне, распространяющейся вдоль В. м., либо экспоненциально убывающей или нарастающей колебат. модем.

Рис. 3. Структура поля волны TE_{10} в прямоугольном волноводе; сплошные линии — силовые линии электрического поля, пунктирные — магнитного поля.



Для прямоугольного В. м. с длиной сторон a и b спектр собств. частот определяется выражением: $\omega_{nm} = c[(n\pi/a)^2 + (m\pi/b)^2]^{1/2}$, где n и m — числа стоячих полуволен, укладываемых вдоль a и b . Чем больше m и n , тем сложнее поле в В. м. Наименьшее $\omega_{кр}$ соответствует $n=1, m=0$, если $b < a$, или $n=0, m=1$, если $a < b$ (мембрана со свободными краями; именно для этой моды была проиллюстрирована выше концепция Бриллюэна). При этом поле E поляризовано в плоскостях $z = \text{const}$.



Рис. 4. Структура поля волны TE_{11} в прямоугольном волноводе.

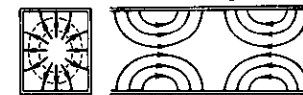


Рис. 5. Структура поля волны TM_{11} в прямоугольном волноводе.

Эти волны наз. TE -волнами (от англ. transverse — поперечный) или H -волнами. Простейшие моды прямоугольного В. м. — волны TE_{10} (рис. 3) и TE_{11} (рис. 4). Задача о мембране с закрепленными краями порождает волны типа TM_{nm} (или E_{nm}). Здесь $n \neq 0$, и $m \neq 0$, т. к. силовые линии магн. поля не могут упираться в