

1. Азы микроволновой техники

1.1. Что такое микроволны

Микроволновое или, иначе, сверхвысокочастотное (СВЧ) излучение — это электромагнитные волны длиной от одного миллиметра до одного метра. Сфера применения микроволновой техники в настоящее время достаточно широка и по мере развития науки и технологии все больше внедряется в нашу повседневную жизнь. Кроме рассматриваемых в этой книге микроволновых печей можно отметить такие области применения, как радиолокация, радионавигация, системы спутникового телевидения, телефонная сотовая связь и многое другое. В последнее время идут интенсивные и небезуспешные исследования по использованию микроволн в медицине и биологии.

Физическая природа микроволнового излучения такая же, как у света или радиоволн. Отличие только в частоте, с которой происходят электромагнитные колебания, или в длине волн, что — то же самое, поскольку последняя связана с частотой соотношением:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

где λ — длина волны, c — скорость распространения волны, f — частота.

Частота, с которой происходят колебания электромагнитного поля, в значительной степени влияет на его внешние свойства. Все знают о существовании радиоволн, инфракрасного или теплового и ультрафиолетового излучения, рентгеновских лучах и видимом свете. Но все это разные проявления одного и того же явления — электромагнитных волн. Различие заключается только в одном — в частоте колебаний (рис. 1.1). И, тем не менее, свойства перечисленных явлений могут отличаться как день от ночи. Причина заключается в соизмеримости длины волны с различными физическими объектами. Например, свет или рентгеновское излучение легко проходят через кристалл, у которого расстояние между атомами меньше длины волны и, наоборот, длинноволновое излучение не сможет проникнуть, допустим, в металлическую трубу даже очень большого диаметра. Поэтому, попав каким-нибудь загадочным образом в цельнометаллический тоннель с транзисторным приемником, не пытайтесь его трясти и бить о стену в надежде извлечь звуки, отличные от треска и шипения.



Рис. 1.1. Шкала электромагнитных волн

Если в низкочастотной электронике принято оперировать понятиями токов и напряжений, то в микроволновом диапазоне в большинстве случаев используются величины, характеризующие электромагнитное поле. Главные из них — это напряженность электрического поля E и напряженность магнитного поля H . Для наглядности электрические и магнитные поля принято изображать в виде силовых линий. Силовые линии не являются реально существующими физическими величинами, а лишь помогают графически отобразить то, что не имеет ни формы, ни цвета, ни запаха. Касательная к силовой линии указывает направление силы, действующей на электрический заряд или магнитный диполь, а плотность расположения силовых линий — на величину напряженности поля.

Например, на рис. 1.2 показано магнитное поле вокруг проводника с током и электрическое поле, образованное двумя точечными зарядами.

Длина волны микроволнового поля — величина того же порядка, что и компоненты электрических схем, поэтому последние очень сильно влияют на его распределение. Если в СВЧ цепь включен резистор, то его ориентация в пространстве, размеры и длина выводов имеют такое же значение, как и номинал, а в некоторых случаях и более важное. Такие компоненты, как конденсаторы и индуктивности, вообще выполняются на СВЧ платах в виде утолщения или сужения токоведущего проводника. В этом есть некоторое преимущество, поскольку многие пассивные элементы технологически можно выполнить очень легко и с минимальными затратами. Например, колебательная система магнетрона, используемого в микроволновых печах, представляет собой медную штампованный болванку со специальными отверстиями. Аналогичная конструкция на более низких частотах потребовала бы не одного десятка конденсаторов и индуктивностей. Но за все в жизни приходится платить. В данном случае некоторая простота в изготовлении с лихвой перекрывается сложностью на этапе расчета и конструирования. Это одна из причин, которые сдерживают широкое распространение микроволновой техники. Есть и другие, не менее важные.

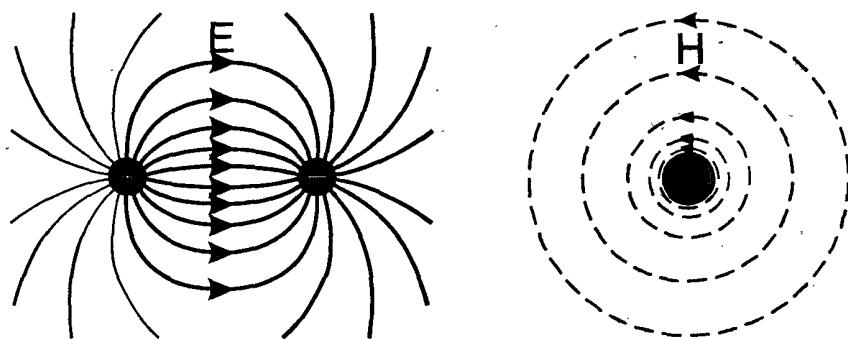


Рис. 1.2. Силовые линии электрического поля E , образованные двумя разноименными точечными зарядами и магнитные силовые линии вокруг проводника с током H

Большую сложность представляет проведение измерений на сверхвысоких частотах. Например, волновое сопротивление, хотя оно и измеряется в омах, невозможно измерить омметром. Электрические параметры элементов микроволновой техники носят распределенный характер. Если в радиотехническом колебательном контуре электрическая энергия сосредоточена в конденсаторе, а магнитная в катушке индуктивности, то в СВЧ резонаторе, выполняющем ту же функцию, электрические и магнитные поля переплетены между собой и отделить емкость от индуктивности, за исключением отдельных специфических случаев, не представляется возможным. Пирожок, подогреваемый в микроволновой печи и, соответственно, являющийся нагрузкой СВЧ цепи, вносит в нее дополнительную емкость, а также индуктивность и сопротивление. Переместив пирожок внутри камеры, мы поменяем соотношение между этими параметрами, поэтому бессмысленно измерять пирожки в микрофарадах, даже если бы они хорошо подходили для использования в СВЧ цепях по другим причинам.

Еще одно препятствие на пути микроволновой техники лежит в плоскости теории. В классической электротехнике существует ряд фундаментальных законов, таких, как закон Ома, законы Кирхгофа и др., с помощью которых можно рассчитать электрическую цепь. Иногда это просто, иногда очень просто, а иногда сверхсложное, но тем не менее можно. Однако в СВЧ диапазоне применение этих законов в чистом виде, как правило, невозможно. Как, например, использовать закон Ома, устанавливающий соотношение между током и напряжением, если отсутствует само понятие напряжения? Все законы классической электротехники имеют ограниченный характер. Это вовсе не означает, что они неверны, но они справедливы только там, где отсутствует излучение. Ранее отмечалось, что радиоволны и видимый свет имеют одну и ту же физическую природу. Но ведь никому не придет в голову измерять яркость солнечного света в вольтах или амперах. В свою очередь законы оптики тяжело использовать при конструировании электрического чайника. В ограниченном применении физических законов нет ничего необычного. В природе подобные явления встречаются на каждом шагу. К примеру, в механике в свое время было обнаружено, что при скоростях, близких к скорости света, не выполняются законы Ньютона, длительное время считавшиеся незыблыми. И только после появления теории относительности Эйнштейна, дополнившей механику Ньютона, все стало на свои места. Оказалось, что существует более общий закон природы, включающий в себя закон Ньютона как составную часть. Подобная же ситуация сложилась в

электродинамике. Существуют уравнения Максвелла, более полно описывающие процессы, связанные с электромагнитным полем во всем спектре электромагнитных колебаний. Законы классической электротехники, как и законы оптики, можно считать частными случаями уравнений Максвелла. В свою очередь, и уравнения Максвелла не являются универсальными. При электромагнитных взаимодействиях элементарных частиц вступают в силу законы квантовой механики, дополняющие уравнения Максвелла. Вполне возможно, что через некоторое время и законы квантовой механики также придется рассматривать как частный случай более общей теории. Уже давно ученые пытаются вывести единую теорию поля, объединяющую все известные виды взаимодействий: гравитационное (описывающее силы притяжения), электромагнитное, сильное и слабое (последние проявляются на уровне атомного ядра). Может возникнуть резонный вопрос: зачем вообще использовать большое количество частных законов, не проще ли пользоваться одним универсальным?

Но проблема в том, что чем более общий характер носит тот или иной закон природы, тем сложнее его практическое использование. К примеру, самый отпетый троекщик, имея под рукой нужные формулы, без труда вычислит мощность, теряемую в резисторе при прохождении электрического тока. Но попробуйте решить ту же задачу с помощью уравнений Максвелла. Без всяких наложений это предмет для докторской диссертации. Исключительно для иллюстрации ниже приведена система указанных уравнений для изотропной и однородной среды:

$$\begin{aligned} \text{rot} \vec{H} &= \sigma \vec{E} + \epsilon \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}; \\ \text{rot} \vec{E} &= -\mu \mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}; \\ \text{div}(\epsilon \epsilon_0 \vec{E}) &= 0; \\ \text{div}(\mu \mu_0 \vec{H}) &= 0. \end{aligned}$$

Что будет в случае анизотропной и неоднородной среды, читатель может домыслить сам.

Если бы электротехникам, в своей работе, приходилось пользоваться исключительно данными уравнениями, мы, скорее всего, до сих пор читали бы при свечах. К счастью, природа распорядилась иначе. Так в низкочастотной электронике, используются намного более простые физические законы, которые можно теоретически вывести из уравнений Максвелла, хотя ради справедливости следует отметить, что большинство из них были экспериментально открыты до того, как Максвелл создал свои уравнения. Такое упрощение возможно, когда размеры электронных компонентов намного меньше длины волн. В этом случае излучение радиоволн практически отсутствует и, поэтому, можно считать, что вся энергия передается вдоль проводников, в виде электрического тока¹. В качестве примера, представим, что на пути проводника с током имеется резистор. Если излучение отсутствует, теряемую в нем мощность можно легко вычислить по простой формуле:

$$P = I^2 R$$

Но, если этот же резистор поставить на пути распространения электромагнитной волны, то результат будет не столь очевиден.

Как уже отмечалось, микроволновый диапазон — это та часть электромагнитного спектра, где классическая электротехника уже не работает, а относительно простые законы оптики еще не работают. Поэтому при решении электродинамических проблем в указанном диапазоне приходится либо изощряться, приспосабливая законы оптики и классической электротехники к СВЧ, либо пытаться решать уравнения Максвелла, что в некоторых случаях приносит свои плоды. Смысл этих уравнений состоит в следующем:

Первое уравнение говорит нам о том, что источником магнитного поля могут служить либо протекающий ток, либо меняющееся во времени электрическое поле. В некотором смысле это

¹На самом деле и в этом случае энергия передается посредством электромагнитного поля. Провода лишь указывают полю маршрут. В качестве доказательства можно привести простой пример: обычная телефонная связь между Санкт-Петербургом и Владивостоком осуществляется по проводам. Если бы энергия передавалась не полем, а носителями тока — электронами, скорость которых значительно меньше скорости света, то ответ на "Привет!" ждать пришлось бы часами.

сходные вещи, поскольку электрический ток представляет собой движение электрических зарядов, а каждый движущийся заряд меняет окружающее электрическое поле и тем самым создает вокруг себя магнитное поле. Это объясняет существование магнитного поля вокруг проводников на постоянном токе. Оно создано совокупностью всех движущихся по проводнику зарядов.

Из второго уравнения следует, что меняющееся во времени магнитное поле порождает замкнутое электрическое поле. Остановимся на этом следствии более подробно.

В низкочастотной электронике принято считать, что источником электрического поля служат электрические заряды. В этом случае силовые линии поля исходят с поверхности заряда или сходятся на нем. Система уравнений Максвелла это не отвергает, указанное свойство отражено в третьем уравнении, однако помимо этого может существовать такая конфигурация электрического поля, когда его силовые линии замкнуты сами на себя, аналогично магнитным силовым линиям. Подобное поле может существовать только в динамике, и чем быстрее происходит изменение магнитного поля, тем благоприятнее условия для возникновения электрического. Именно поэтому на низких частотах полевые эффекты практически не проявляются и ими можно пренебречь. Наличие кольцевого электрического поля создает возможность для возникновения и распространения радиоволн. Поясню это на следующем примере: допустим, у нас имеется проводник, по которому протекает высокочастотный ток. Вокруг этого проводника, следовательно, будет существовать быстро изменяющееся магнитное поле. Это, в свою очередь, приведет к возникновению кольцевого электрического поля, меняющегося с той же частотой. Последнее породит магнитное поле, и так до бесконечности. Исходный проводник с током, являющийся антенной, только инициирует процесс, а дальше все происходит сама собой. Энергия электрического поля переходит в магнитную энергию, и наоборот. Причем весь этот процесс не стоит на месте, а распространяется с максимально допустимой скоростью — 300 000 км/сек.

И, наконец, последнее уравнение Максвелла указывает на отсутствие в природе одиночных магнитных зарядов. Последнее обстоятельство вносит некоторую асимметрию в систему уравнений. Действительно, если в электростатике имеются положительные и отрицательные заряды, способные существовать независимо друг от друга, то магнитные полюса неразделимы, как сиамские близнецы. На какие бы мелкие части мы ни дробили постоянный магнит, мы никогда не получим отдельно S или N полюс. Подобная асимметрия, как бы демонстрирующая приоритет одного поля над другим, смущала многих физиков с момента появления рассматриваемых уравнений. Попытки обнаружить отдельный магнитный полюс никогда не прекращались и предпринимаются до сих пор. И не только из праздного научного любопытства. Если бы удалось на практике разделить магнитные полюса, это совершило бы такую революцию в технике, масштабы которой трудно даже представить.

Заканчивая с разбором уравнений Максвелла, совершим небольшой экскурс в историю. В середине прошлого века, когда были получены эти уравнения, о существовании электромагнитных волн еще никто не подозревал. Эти уравнения как бы обобщали и сводили воедино все, что было известно физикам того времени об электричестве и магнетизме. Лишь в результате анализа полученных уравнений Максвелл пришел к выводу о наличии в природе электромагнитных волн и о скорости их распространения, в точности совпадающей с известной к тому времени скоростью света. На основании этого была высказана гипотеза об электромагнитной природе видимого света, подтвержденная дальнейшими исследованиями.

Примерно такая же ситуация возникла при открытии Менделеевым его Периодической таблицы, предсказавшей существование в природе многих химических элементов, до той поры неизвестных науке. Уместно в этой связи привести слова немецкого физика Генриха Герца, посвященные теории Максвелла: "Нельзя изучать эту удивительную теорию, не испытывая по временам такого чувства, будто математические формулы живут собственной жизнью, обладают собственным разумом, — кажется, что эти формулы умнее нас, умнее даже самого автора, как будто они дают нам больше, чем в свое время было в них заложено". И действительно, мог ли предположить Максвелл, какой переворот в жизни людей совершит практическая реализация изобретений, в основе которых лежат четыре его уравнения.

1.2. Элементы микроволновой техники

Вполне понятно, что специфика СВЧ излучения накладывает свой отпечаток и на компоненты, из которых строятся электрические схемы. Мы рассмотрим только те из них, которые в той или иной мере встречаются в микроволновых печах.

Волноводы

Для передачи энергии от генератора к нагрузке в СВЧ диапазоне используются волноводы. Волновод представляет собой полую, металлическую трубу, как правило, круглого или прямоугольного сечения (рис. 1.3).

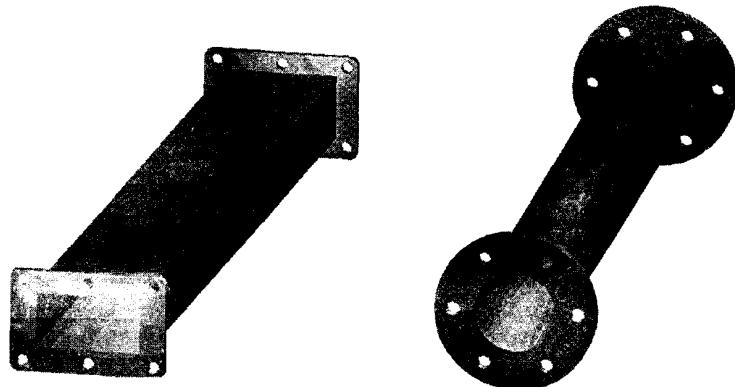


Рис. 1.3. Внешний вид прямоугольного и круглого волноводов

Электромагнитная энергия передается по волноводу примерно так же, как вода по водопроводной трубе. В принципе, водопроводная труба, если ее тщательно очистить от грязи и накипи, вполне может быть использована и для транспортировки электромагнитных волн. Продолжая аналогию, можно заметить, что в местах протечки воды может просачиваться и электромагнитная энергия, поэтому соединение отрезков волноводов необходимо производить как можно плотнее. На этом, пожалуй, сходство заканчивается, и начинаются различия. Глядя на рисунок, нетрудно понять, что изготовление волноводов вещь не простая и дорогостоящая. В отличие от ржавых внутренностей водопроводной трубы внутренняя поверхность волноводов часто полируется и покрывается тонким слоем серебра. Очевидно, что переход с обычной двухпроводной линии на волноводы произошел не с целью экономии средств. Остановимся более подробно на причинах такого перехода. Как уже отмечалось, с повышением частоты возрастает доля мощности, теряемой на излучение. Кроме того, что это плохо само по себе, это приводит к засорению эфира радиопомехами и отрицательно сказывается на здоровье радио- и электронных устройств. Поэтому уже в метровом диапазоне передача сигналов осуществляется по коаксиальному кабелю, представляющему собой двухпроводную линию, у которой один проводник выполнен в виде экранирующей оплетки, предотвращающей излучение энергии. Однако при дальнейшем повышении частоты возрастают потери, связанные с затуханием сигнала в материале, заполняющем пространство между центральной жилой и оплеткой кабеля. При достаточно высокой частоте и большой передаваемой мощности это приводит к перегреву кабеля и выходу его из строя. Например, коаксиальный кабель РК-75 с полиэтиленовым наполнением и длиной 10 м на частоте 3 ГГц теряет 84% передаваемой мощности. Медный прямоугольный волновод при тех же условиях теряет всего около 5% мощности. Используя в качестве наполнителя материалы с малым затуханием, можно повысить уровень допустимой передаваемой мощности, а поскольку наименьшими потерями обладает воздушное заполнение, то кабель естественным образом трансформируется в коаксиальный волновод. Конструктивно последний уже ничем не проще волноводов, изображенных на рис. 1.3, скорее даже наоборот, поэтому выбор типа волновода определяется уже не экономической целесообразностью, а различием в их характеристиках. Может возникнуть вопрос, откуда вообще берутся потери в волноводе, если он изготовлен из меди с площадью поперечного сечения в десятки миллиметров? Ответ заключается в том, что токи текут не по всему сечению волновода, а лишь там, куда проникает электромагнитное поле по так называемому скин-слою. Глубина скин-слоя зависит от частоты и удельной проводимости металла, из которого изготовлен волновод. Она вычисляется по формуле:

$$\delta[\text{мкм}] = 0.016 \sqrt{\frac{1}{f[\text{ГГц}] \cdot \sigma[1/\text{Ом} \cdot \text{м}]}}$$

К примеру, на частоте 2.45 ГГц глубина проникновения поля составляет от 1.3 мкм для меди до 10 мкм для нержавеющей стали. Поэтому общая площадь поперечного сечения, по которому проходит ток, относительно невелика. Большое значение имеет качество внутренней поверхности волновода. Чем выше шероховатость стенок волновода, тем длиннее путь СВЧ токов и тем быст-

рее происходит затухание волны. Поэтому для снижения потерь волноводы иногда полируют и покрывают тонким слоем серебра, на глубину скрин-слоя.

В СВЧ технике встречаются волноводы с различным профилем поперечного сечения: П-образные, Н-образные, круглые, овальные и т.д. В микроволновых печах используются только прямоугольные волноводы, поэтому мы ими и ограничимся.

В целом конфигурация поля в волноводе может иметь очень сложную форму. К счастью, теория дает механизм, позволяющий свести сложную структуру поля к набору относительно простых типов, из которых, при желании, можно воссоздать любую конфигурацию существующих в волноводе полей. Прежде чем начать анализ типов, существующих в прямоугольном волноводе, сформулируем некоторые правила, которые вытекают из теории электромагнитных колебаний.

1. Электрические и магнитные силовые линии в электромагнитных полях взаимно перпендикулярны.
2. Магнитные силовые линии замкнуты и охватывают проводник с током или переменное электрическое поле.
3. Электрические силовые линии или идут от одного электрического заряда к другому, или подобно магнитным линиям замкнуты и охватывают переменное магнитное поле.
4. Изменение электромагнитного поля во времени и в пространстве, вдоль произвольного направления, в однородной среде, происходит по синусоиде или косинусоиде.
5. При нормальном отражении волны от проводящей поверхности (т.е. когда направления падающей и отраженной волн прямо противоположны) ее фаза изменяется на 180°.
6. Магнитные силовые линии у поверхности проводника всегда параллельны этой поверхности.
7. Электрические силовые линии не могут идти вдоль поверхности проводника, а всегда перпендикулярны этой поверхности.

Два последних свойства определяют структуру поля у поверхности проводника, т.е. на границе между проводником и областью распространения электромагнитной волны. Поэтому их называют "граничными условиями". Электромагнитное поле всегда имеет такую структуру, при которой выполняются эти условия.

При распространении волн в волноводе вдоль поперечных координат устанавливаются так называемые стоячие волны. В данном случае название говорит само за себя. Хотя структура волны в поперечном направлении может быть точной копией структуры волны в продольном направлении, между ними, как говорят в Одессе, есть две большие разницы. В первом случае поле статично и никакого движения вдоль поперечных координат не наблюдается, меняется лишь амплитуда поля, а во втором случае картина поля все время сдвигается в сторону распространения волны со скоростью v .

Распространяемые по волноводу электромагнитные волны условно можно разделить на два основных типа. Волны, имеющие составляющую электрического поля вдоль направления распространения и не имеющие магнитной, относятся к Е-типу. И наоборот, волны, имеющие магнитную составляющую вдоль направления распространения и не имеющие электрической, относятся к Н-типу. Каждый тип волны обозначается соответствующей буквой с индексом из двух цифр, показывающим число стоячих полуволн вдоль большей и меньшей сторон поперечного сечения волновода. Таким образом, по названию волны можно определить соответствующую ей структуру поля.

Если размеры обеих поперечных координат меньше, чем длина полуволны, то через такой волновод волна распространяться не может. В этом случае говорят, что волновод является запрещенным для данного типа волны.

Наибольшая длина волны, которая может распространяться по волноводу, называется критической. При фиксированных размерах волновода критическая длина волны зависит от ее типа. Ниже приведена формула для ее расчета.

$$\lambda_{kp} = \frac{2}{\sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}}}$$

Как видно из формулы, чем выше индексы m и n , тем больше должны быть поперечные размеры волновода, при которых возможно распространение данного типа. Это обстоятельство облег-

чает селекцию типов, поскольку на рабочей длине волны всегда можно так подобрать размеры a и b , чтобы распространялись только нужные типы волн. На практике в качестве рабочего обычно используется тип H_{10} , изображенный на рис. 1.4. Для большей наглядности на рисунке также приведены графики распределения электрического и магнитного полей вдоль широкой стенки. Равенство нулю второго индекса в названии волны говорит о том, что вдоль узкой стенки поле не меняется. Обратите внимание, что отсутствует не само поле, а лишь его изменение. Таким образом, размер b не влияет ни на структуру распределения полей в волноводе, ни на его критическую частоту. Практически из этого следует, что даже очень узкая щель, шириной более $\lambda/2$, может рассматриваться как волновод, проводящий СВЧ энергию с минимальными потерями.

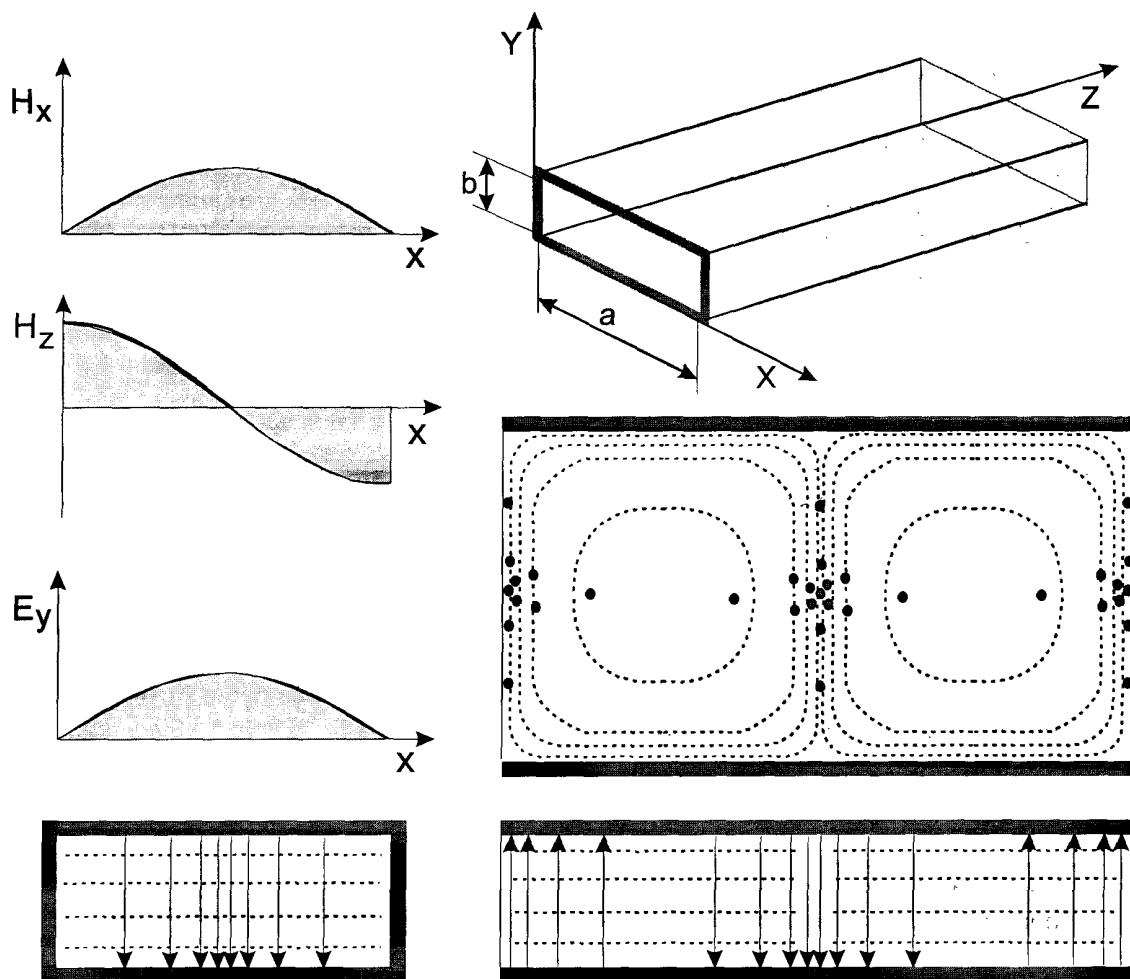


Рис. 1.4. Структура электромагнитного поля в прямоугольном волноводе для волны типа H_{10}

Столь тщательное рассмотрение этого типа не случайно, поскольку он является основным для прямоугольного волновода. Можно даже сказать, основным в квадрате, поскольку, во-первых, это рабочий тип волны для подавляющего большинства задач, в частности именно этот тип используется в микроволновых лехах, а во-вторых, он основной по определению. Для волноводов произвольного поперечного сечения основным называется наиболее низкочастотный тип волны. Все остальные — это высшие типы, как правило, являющиеся паразитными. Основные преимущества данного типа волны состоят в следующем:

1. Наименьшие размеры волновода, при заданной длине волны.
2. Простая конфигурация поля и, как следствие, простота при его возбуждении и при согласовании волновода с нагрузкой или другими устройствами.
3. Относительная удаленность от других типов, что облегчает его селекцию.

Как известно, все познается в сравнении, поэтому не лишним будет вкратце рассмотреть и некоторые другие типы волн. Если постепенно увеличивать частоту, излучаемую через волновод,

т.е. уменьшать длину волны, то в определенный момент вдоль широкой стенки волновода сможет уместиться две стоячие полуволны. Тогда создадутся условия для возникновения типа H_{20} . При дальнейшем увеличении частоты появятся типы H_{01} , H_{11} , E_{11} и т.д. Структура полей для типов, ближайших к основному, показана на рис. 1.5. Анализируя эти типы, не трудно выявить определенные закономерности в структуре полей и, при желании, построить типы с более высокими индексами.

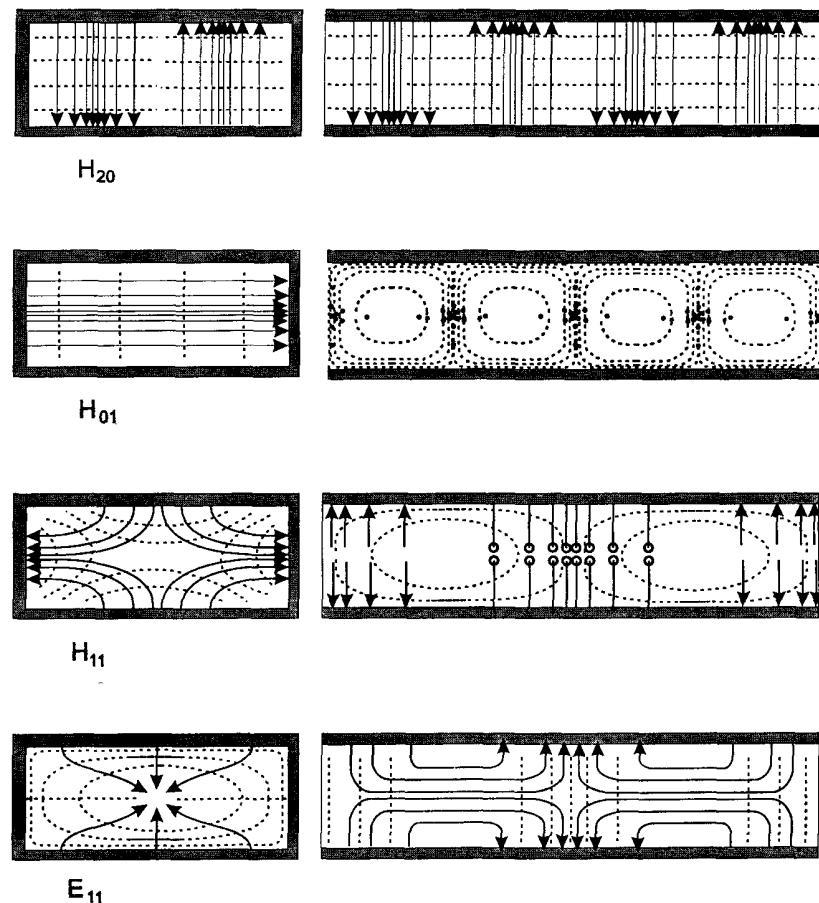


Рис. 1.5. Структура ближайших к основному типов волн в прямоугольном волноводе

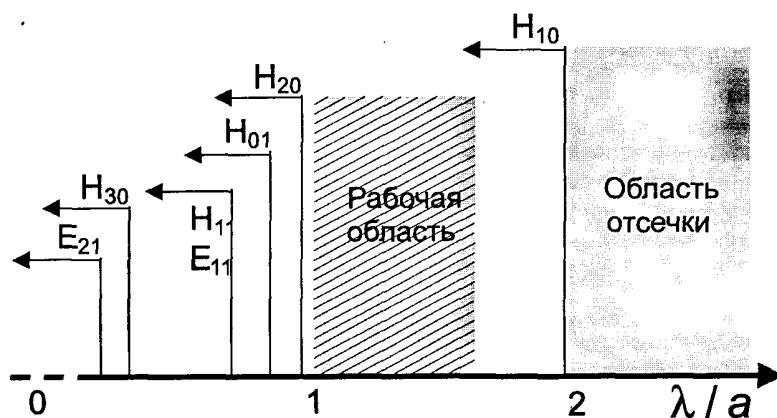


Рис. 1.6. Критические длины волн прямоугольного волновода (стрелки указывают области, в которых указанные типы волн могут распространяться по волноводу)

На рис. 1.6 представлена диаграмма распределения критических длин волн, наиболее близких к основному типу. У стандартных волноводов, как правило, выполняется соотношение $b/a < 0.5$, поэтому ближайшим к основному является тип H_{20} . При этом расстояние между критическими длинами волн основного типа и всеми последующими увеличивается.

Заштрихованный участок показывает область длин волн, рекомендованных к использованию, поскольку в этом случае будет распространяться единственный тип H_{10} . Данный участок не примыкает непосредственно к области отсечки. Это не случайно. Дело в том, что распространение электромагнитных волн в замкнутых системах, какой и является волновод, отличается от их распространения в свободном пространстве. Это, в частности, проявляется в том, что скорость распространения электромагнитной энергии в волноводе меньше чем скорость света. Различие наиболее ощутимо в окрестности критической длины волны. Замедление скорости электромагнитных волн увеличивает потери энергии в стенах волновода. На рис. 1.7 показана зависимость затухания в волноводе от частоты, из которой видно, что при частотах, близких к критической, потери возрастают во много раз.

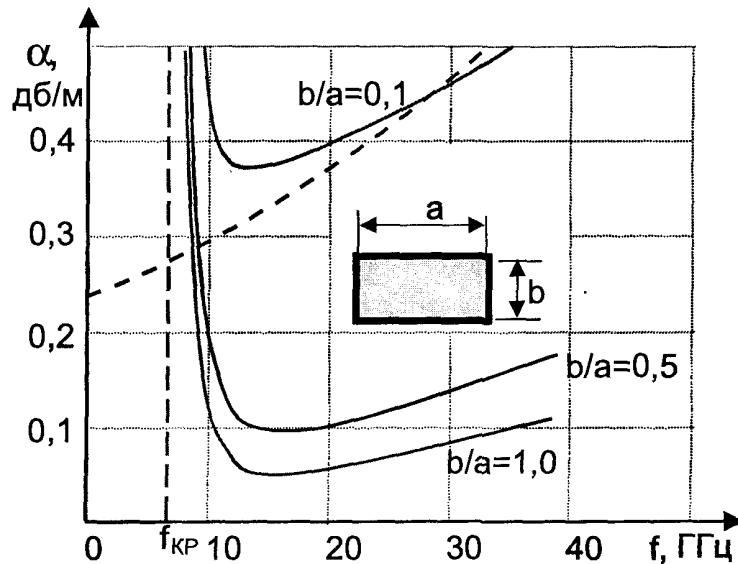


Рис. 1.7. Зависимость потерь в стенах прямоугольного волновода от частоты (штриховой линией отмечен коаксиальный волновод с той же площадью поперечного сечения)

Попутно заметим, что рост потерь при увеличении частоты связан с уменьшением толщины скин-слоя. Пунктирной линией для сравнения показана аналогичная зависимость для коаксиального волновода с той же площадью поперечного сечения. Как видим, сравнение не в пользу последнего, если не считать узкой полоски вблизи критической частоты. Именно поэтому этот участок и не используется на практике.

Длина волны в волноводе λ_b больше длины той же самой волны в свободном пространстве. Эта разница тем ощутимее, чем ближе λ_b расположена к $\lambda_{\text{кр}}$. Ниже приведена формула для расчета λ_b , которая может быть полезна при расчете и анализе различных волноводных устройств.

$$\lambda_b = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon\mu - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}}$$

При воздушном заполнении волновода — $\epsilon\mu=1$ и формула слегка упрощается.

Возбуждение волноводов

Возбуждение волн в волноводе можно осуществить с помощью устройства, создающего в некотором сечении волновода переменное электрическое или магнитное поле, совпадающее по конфигурации силовых линий с полем волны требуемого вида. Возбуждение волн происходит также при создании в стенах волновода СВЧ токов, совпадающих с токами волны желаемого типа. Сразу оговоримся, что любое устройство, служащее для возбуждения волн, с таким же успехом может использоваться для их приема.

При передаче энергии от генератора к нагрузке, большое значение имеет согласование передающего тракта. Под согласованием понимается способность передающей линии обеспечить

полное прохождение к нагрузке электрической мощности вырабатываемой генератором. Это одна из наиболее сложных задач при проектировании микроволновых систем, особенно большой мощности. Любые неоднородности в тракте, к числу которых относятся и элементы возбуждения, и сама нагрузка, способны привести к отражению мощности обратно к генератору. Помимо того, что это снижает выходную мощность и КПД системы, отраженная энергия неблагоприятно воздействует на генератор и при большом рассогласовании может вывести его из строя.

Обычно, энергия от генератора поступает по коаксиальной линии. Подключение ее к волноводу осуществляется либо в виде магнитной петли связи, либо в виде электрического штыря (рис. 1.8).

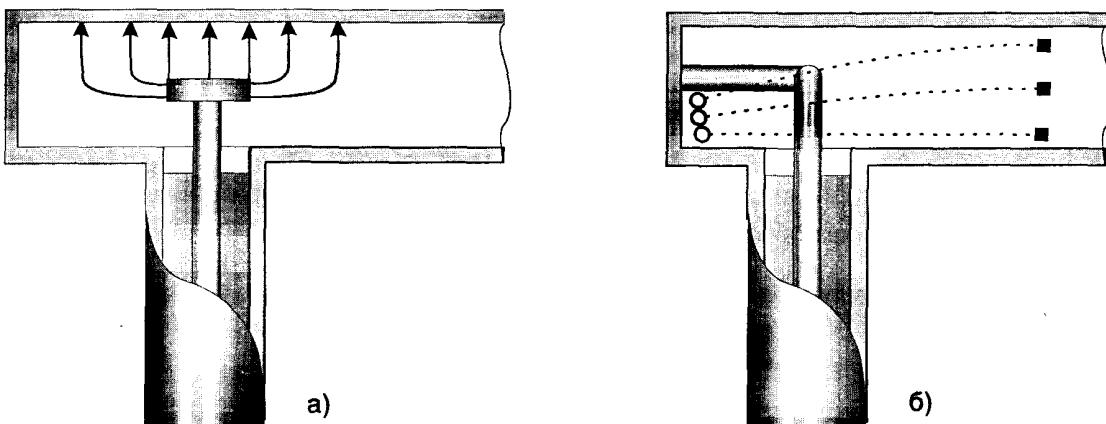


Рис. 1.8. Емкостной (а) и индуктивный (б) способы возбуждения волновода

Магнитная петля связи, как правило, располагается в месте, где магнитное поле наиболее сильно, причем ее плоскость перпендикулярна магнитным силовым линиям. Подобный вид связи, в частности, используется внутри магнетрона для отбора энергии от его колебательной системы.

Электрический штырь размещается в максимуме электрического поля, вдоль его силовых линий. Во многих случаях штырем служит продолжение внутреннего провода коаксиальной линии или вывод энергии генераторного прибора. Такой тип возбуждения используется в большинстве микроволновых печей. Обычно в них мощность от магнетрона попадает в рабочую камеру через небольшой отрезок прямоугольного волновода. Оказывается, проще согласовать магнетрон с волноводом, а затем волновод с рабочей камерой, чем непосредственно магнетрон с камерой.

Возбуждение волновода не такой простой вопрос, как может показаться на первый взгляд. Наибольшие сложности возникают при согласовании, в микроволновых печах в особенности, поскольку нагрузка в этом случае может меняться в широких пределах. Практически невозможно согласовать магнетрон с рабочей камерой таким образом, чтобы и при максимальной загрузке печи и при практически пустой камере отражаемая мощность находилась в допустимых пределах (не более 25 — 30%). Поэтому во всех руководствах к микроволновым печам оговаривается минимальная загрузка камеры (около 200 г). Аналогичные сложности возникают при попытке замены магнетрона одного типа на другой, даже если основные электрические параметры у них практически одинаковы. Если имеются отличия в геометрических размерах вывода энергии, могут возникнуть проблемы, непредвиденные для непосвященных. Для посвященных проблемы останутся, но статус их изменится. Они станут ожидаемыми и во многих случаях устранимыми. Рассмотрим более детально возбуждение электромагнитных волн в волноводе. Типичная конструкция подключения магнетронного генератора к волноводу показана на рис. 1.9а.

Вывод энергии магнетрона по своей сути — это антенна в виде электрического штыря, являющегося продолжением внутренней жилы коаксиального волновода. Прямоугольный волновод с одной стороны закорочен металлической стенкой, расположенной на расстоянии примерно в четверть длины волны. Размеры штыря и расстояние до короткозамыкающей стенки являются ключевыми при согласовании генератора с магнетроном. Известно, что оптимальная длина антенны в свободном пространстве равна $\lambda/4$. В нашем случае это чуть более 3 см. Длина антенны в волноводе должна быть несколько ниже этого значения, поскольку электрическая емкость, образованная верхней крышкой волновода и торцом антенны, увеличивает эффективную длину последней. Другими словами, увеличение торцевой емкости антенны эквивалентно некоторому увеличению ее длины. Последний вариант менее предпочтителен, поскольку, во-первых, создает у острия антенны

высокую напряженность поля, что может привести к электрическим пробоям, во-вторых, увеличивает локальный разогрев антенны и, наконец, требует большей высоты волновода. Обычно вывод магнетрона оканчивается медным колпачком шириной около 1.5 см. Это увеличивает торцевую емкость, поэтому длина антенны может быть несколько ниже чем $\lambda/4$. Форма и размеры колпачков, а также длина антенны у разных магнетронов могут отличаться друг от друга. Это связано с тем, что каждый магнетрон рассчитан на работу с волноводом определенных размеров. Поэтому при замене магнетронов важно это учитывать и стараться подбирать замену не только в соответствии с электрическими параметрами, но и с одинаковыми выводами энергии.

Теперь рассмотрим, какое значение имеет расстояние L между торцевой стенкой волновода и выводом энергии магнетрона. Как было сказано ранее, это расстояние примерно равно $\lambda/4$. Вначале, для простоты, допустим, что вывод энергии не нарушает структуру поля в волноводе. В соответствии с граничными условиями электрическое поле распределится в волноводе по синусоиде. Штырь магнетрона будет излучать электромагнитные волны во всех направлениях. Назовем волну, движущуюся в нужном направлении, т.е. к нагрузке, — прямой волной, а волну, движущуюся в противоположном от желаемого направлении — обратной. Обратная волна после зеркального отражения от металлической стенки изменит свою фазу на 180° . Поскольку на ее движения к стенке и обратно уйдет половина периода, или еще 180° , то в тот момент, когда отраженная волна достигнет штыря, ее фаза, сделав полный оборот на 360° будет такой же, как и у прямой волны. Поэтому они сложатся и с удвоенной мощностью дружно устремятся в камеру микроволновой печи.

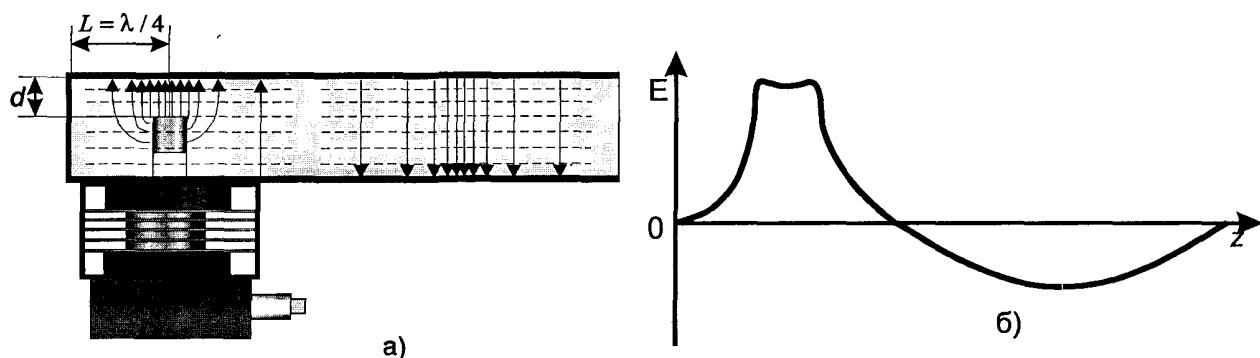


Рис. 1.9. Подключение магнетрона к волноводу (а) и распределение напряженности электрического поля в волноводе (б)

Теперь предположим, что расстояние L будет не $\lambda/4$, а $\lambda/2$. В этом случае отраженная от стены волна, возвратясь к штырю, окажется в противофазе с прямой. Эти волны взаимно уничтожаются, распространения энергии вдоль нужного направления не произойдет, и пирожки в камере останутся холодными. Но, как вывел еще Михаило Ломоносов, ничто не исчезает бесследно. Не сумев пробиться в камеру, микроволновая энергия отправится обратно в магнетрон и будет там вершить свои черные дела.

Мы рассмотрели два крайних случая — наилучший и наихудший. Любое другое расположение штыря даст промежуточный результат, т.е. часть энергии уйдет на нагрев пирожков, а часть — на нагрев магнетрона.

В наших рассуждениях мы предполагали, что штырь не изменяет структуру поля. Однако как вы, безусловно, догадываетесь, это далеко не так. Вносимая штырем емкость нарушает синусоидальную форму распределения электрического поля вблизи него. Поле будет концентрироваться в основном внутри этой емкости, и идеальная синусоида трансформируется в реальную картинку на рис. 1.9б.

Теперь перейдем к практическим выводам, которые вытекают из предыдущего материала. Если при замене магнетрона происходит изменение емкости, из-за большей или, наоборот, меньшей длины вывода энергии, то неизбежно произойдет рассогласование, следствием которого может оказаться перегрев магнетрона и слабый нагрев в камере микроволновой печи. В принципе, в некоторых случаях это можно устранить. Например, изменив емкость или сместив магнетрон относительно торцевой стенки. Но лучше этого не делать, поскольку результат подобных действий без специального оборудования трудно отследить, а заранее вычислить необходимые корректировки практически невозможно. Самый простой и надежный способ — это подобрать новый магнетрон с такой же высотой вывода энергии, как и у старого.

Запредельные волноводы, диафрагмы

Если поперечные размеры волновода меньше критической длины волны, то такой волновод называется запредельным. Распространения энергии через него не происходит. Необходимо помнить, что термин “запредельный” всегда относителен. Всякий волновод является запредельным для одних частот и обычным для других. Поэтому, когда говорят “запредельный”, всегда подразумевается рабочая частота, для которой волновод таковым является. С помощью подобного волновода можно обеспечить доступ к области, в которой сосредоточено электромагнитное поле, и в то же время избежать утечки энергии.

Несмотря на то что распространение энергии в запредельном волноводе отсутствует, переменные электрическое и магнитное поля существуют. Силовые линии поля как бы втягиваются в полость волновода. Амплитуда этих полей убывает по экспоненте по мере удаления от входа. Количественно степень убывания поля снижается примерно в 1000 раз при удалении от входа на расстояние, равное $\lambda_{\text{кр}}$. В свою очередь, критическая длина волны примерно вдвое превышает диаметр круглого волновода. Поэтому если, например, мы имеем отверстие диаметром 1 мм в металлической стенке толщиной 2 мм, то напряженности полей на противоположных концах этого отверстия будут отличаться, примерно, в 1000 раз. Но это еще не значит, что одна тысячная доля СВЧ мощности будет излучаться в окружающее пространство. Для того чтобы это произошло, необходимо непосредственно у отверстия иметь какой-нибудь приемник микроволнового излучения, например коаксиальный кабель с петлей связи на конце. При его отсутствии лишь очень малая часть энергии, сосредоточенной у выходного отверстия, будет излучаться наружу. Практически, для тех соотношений размеров, которые приведены в нашем примере, можно считать, что излучение отсутствует полностью.

Камера микроволновой печи содержит большое количество различных отверстий, предназначенных для освещения, конвекции воздуха, визуального наблюдения и т.д. Поэтому важно знать, при каких условиях обеспечивается достаточная экранировка камеры. Насколько правомерно считать отверстие в камере запредельным волноводом, если его продольные размеры значительно меньше $\lambda_{\text{кр}}$? Предположим, что толщина стенки близка к нулю. Такое отверстие уже просто неприлично называть волноводом, поэтому будем называть его диафрагмой, как принято в технической литературе по СВЧ. Соответственно условие $\lambda > \lambda_{\text{кр}}$ уже не может быть достаточным для надежной экранировки. Расчет поля проникающего сквозь диафрагму довольно сложен, поэтому мы рассмотрим лишь некоторые факты, которые позволяют как-то ориентироваться в уровне излучения сквозь отверстия в камере микроволновой печи. Практика показывает, что излучение превышающее допустимый уровень, возникает, когда диаметр круглого отверстия составляет примерно 15 — 20 мм. Поле, возбуждаемое круглой диафрагмой, пропорционально кубу ее радиуса. Поскольку излучение из нескольких отверстий примерно пропорционально их числу, то замена одного большого отверстия несколькими малыми, с той же площадью поперечного сечения, приводит к ослаблению поля в \sqrt{P} раз. Этот факт используется при проектировании окон в микроволновых печах, которые изготавливаются в виде мелкоперфорированной сетки. Попутно заметим, что уменьшение диаметра ячеек сетки положительно сказывается и на дизайне микроволновой печи.

Если диафрагма представляет собой не круглое, а щелевое отверстие, то большое значение имеет его пространственная ориентация. Узкая щель не излучает, если она располагается вдоль линий тока, как это показано на рис. 1.10. Иначе говоря, излучение сквозь щель возникает только тогда, когда она прерывает линии тока на поверхности проводника. Сказанное относится к узкой щели, ширина которой значительно меньше длины волны возбуждающих колебаний.

Значительное повышение излучения сквозь диафрагму может произойти, если непосредственно вблизи отверстий расположены какие-либо провода или иной проводящий мусор. Особенно если сквозь отверстие проходит отрезок проводника. Это может быть забытый при ремонте или сборке винт, шурп, кусок провода и т.д. В этом случае диафрагма может превратиться в отрезок коаксиального волновода, для которого не существует ограничений на диаметр, и излучаемая мощность может увеличиться в сотни раз. Отсюда вывод: чистота — залог здоровья.

Резонаторы

Если в волноводе на рис. 1.9 на пути распространения электромагнитной волны поставить металлическую стенку, то волна отразится от нее и двинется в обратном направлении. Дойдя до противоположной стенки, она вновь отразится, и этот процесс будет повторяться до тех пор, пока из-за потерь энергии в стенках волновода волна окончательно не затухнет. Если при этом фазы многократно отраженных от стенок волн будут совпадать, то эти волны, взаимно усиливая друг

га, могут в сотни раз увеличить напряженности электромагнитных полей в рассматриваемой области.

Как известно из физики, суммирование одинаковых по частоте и амплитуде волн, движущихся в противоположных направлениях, дает в итоге стоячую волну. Поэтому в рассматриваемом объеме структура полей вдоль продольной оси будет подобна структуре полей вдоль остальных координат. Это утверждение не очевидно, и некоторым читателям может показаться сомнительным. В качестве доказательства можно привести пример, часто наблюдаемый в природе. Стоя у каменной набережной, можно заметить, как волны, направленные к берегу, складываясь с отраженными от гранитных стен, создают иллюзию полного отсутствия продольного движения. Волны поднимаются и опускаются, находясь на одном и том же месте и никуда не двигаясь. По этому поводу хорошо сказал "большой ученый" Козьма Прутков: "Бросая в воду камешки, смотри на круги, ими образуемые; иначе такое бросание будет пустою забавою".

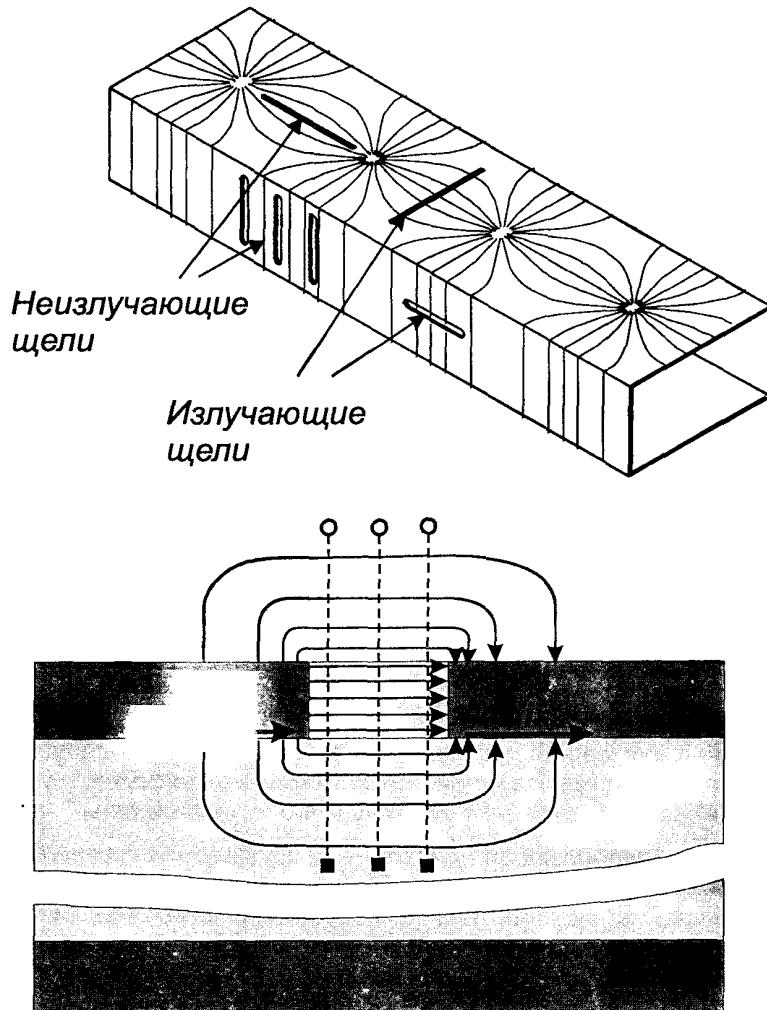


Рис. 1.10. Влияние ориентации щелей в волноводе на их излучающую способность (распределение токов на внутренней поверхности волновода показано для волны типа H_{10})

Явление, при котором устанавливается режим стоячих волн, называется резонансом, а устройство, где все это происходит, — резонатором. Геометрическое тело, образованное нами в результате манипуляций с волноводом, есть не что иное, как призма; соответственно подобные резонаторы называются призматическими. Разумеется, призматическая форма не является обязательным атрибутом резонатора. Любой объем, ограниченный со всех сторон проводящей поверхностью, может рассматриваться как резонатор. Однако на практике стремятся использовать простые формы, поскольку их параметры могут быть просчитаны аналитически. Более сложные формы требуют расчетов с помощью специальных численных методов на мощных компьютерах, причем время, требуемое для расчета только резонансных частот, может измеряться часами. Но

никакой компьютер не поможет, если резонатор имеет форму, не поддающуюся математическому описанию. В этом случае помочь может только эксперимент, то есть вы изготавливаете резонатор замысловатой формы, который, на ваш взгляд, должен обладать превосходными свойствами, включаете — не работает; вносите корректизы, включаете — не работает. И так до тех пор, пока не добьетесь требуемого результата или пока не лопнет ваше терпение и вы не решите, что лучше заняться выращиванием кактусов.

Аналогом резонатора в радиотехнике служит колебательный контур. Этапы постепенного преобразования резонатора в контур по мере увеличения резонансной частоты показаны на рис. 1.11.

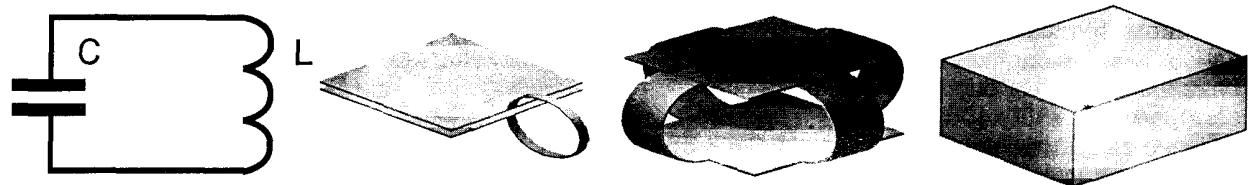


Рис. 1.11. Последовательный переход от колебательного контура к резонатору по мере увеличения частоты

Частота колебательного контура вычисляется по формуле:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

где L — индуктивность катушки контура, а C — емкость конденсатора.

С повышением резонансной частоты контура значения величин L и C уменьшаются. Конструктивно это выглядит как раздвижение пластин конденсатора и снижение количества витков катушки сначала до одного, а затем до нескольких, параллельно включенных полувитков, которые в пределе сливаются в единую замкнутую полость. Как и в контуре, основными параметрами резонатора являются резонансные частоты и добротность. Рассмотрим каждый из этих параметров в отдельности применительно к призматическому резонатору, как наиболее нас интересующему. Мы получили его из волновода, поэтому вполне естественно, что часть свойств волновода будет присуща и призматическому резонатору. Множество типов волн, существующих в волноводе, трансформируется в стоячие волны резонатора, которые образуют множество видов колебаний. По аналогии с прямоугольным волноводом, виды колебаний призматического резонатора обозначаются путем добавления к типу волны еще одного индекса, указывающего количество стоячих полуволн вдоль продольной координаты. Собственно понятия продольной и поперечной координат для резонатора теряют смысл, поскольку структура полей в любом направлении зависит только от вида колебаний и геометрических размеров сторон. Ни одно из направлений нельзя выделить как приоритетное. При этом следует помнить, что обозначение вида колебаний связано с определенной ориентацией призматического резонатора. Например, один и тот же вид может рассматриваться как H_{110} , H_{101} , H_{011} в зависимости от выбранной системы координат.

Каждый вид колебаний в резонаторе характеризуется собственной резонансной частотой и добротностью. Аналогично волноводу, самый низкочастотный вид называется основным, остальные — высшими видами. На практике обычно используется основной вид, по тем же причинам, что и в случае волновода. Камера микроволновой печи, которую можно рассматривать как призматический резонатор, — это как раз то редкое исключение из правила, которое подтверждает само правило. Дело в том, что резонансные явления в камере, скорее, вынужденная необходимость, чем желательное явление. Более подробно этот вопрос будет рассмотрен в разделе “Камера микроволновой печи”.

Длины волн резонаторных видов колебаний вычисляются по формуле, напоминающей формулу для расчета критических длин волн в волноводе:

$$\lambda_0 = \frac{2}{\sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} + \frac{p^2}{l^2}}}$$

Как и в волноводе, в резонаторе существуют E и H виды колебаний. Но, как следует из приведенной формулы, резонансная частота зависит только от индексов вида колебаний, а не от типа волны. Например, колебания видов E_{111} и H_{111} будут происходить на одной и той же частоте. В этом случае говорят, что данные виды колебаний являются вырожденными. Реальная картина поля в резонаторе будет представлять собой коктейль из этих видов. Преобладание колебаний того или иного вида будет связано только с условиями возбуждения.

Ранее была отмечена аналогия между резонатором и колебательным контуром. Но есть существенная разница между видами колебаний в резонаторе и гармониками контура. Природа этих различий кроется в пространственной форме колебаний в резонаторе, в то время как в контуре электромагнитная энергия может двигаться только в одном направлении — вдоль проводника с током. Поэтому гармоники всегда кратны основной частоте, а в резонаторе все определяется соотношением индексов m , n , p , различные сочетания которых позволяют получать большое разнообразие видов колебаний, частоты которых могут распологаться на любом расстоянии от основной частоты. На рис. 1.12а показан спектр резонансных частот для резонатора с поперечными размерами $200 \times 300 \times 400$ мм, то есть примерно соответствующим камере микроволновой печи. Как нетрудно заметить, чем дальше мы удаляемся в сторону более высоких частот, тем гуще расположены резонансные частоты. В пределе они сливаются в сплошной спектр. Штриховой линией отмечена рабочая частота микроволновых печей. Несмотря на то, что непосредственно на рабочей частоте нет ни одного резонанса, в камере они будут возбуждаться в большом количестве. Чтобы понять, каким образом это происходит, необходимо вначале рассмотреть второй основной параметр резонатора — добротность.

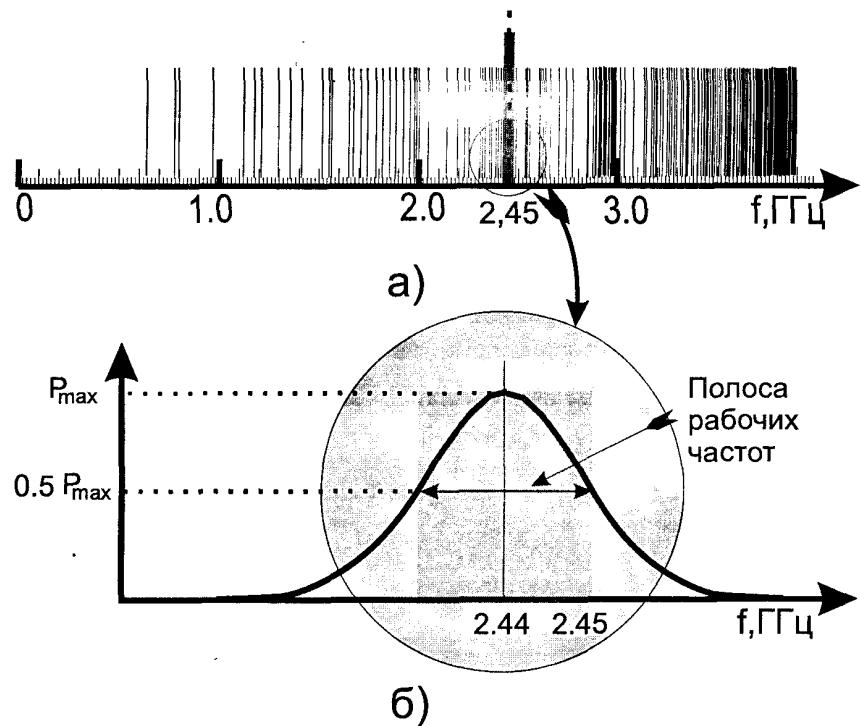


Рис. 1.12. Спектр резонансных частот камеры микроволновой печи с поперечными размерами $200 \times 300 \times 400$ мм (а), и амплитудно-частотная характеристика резонанса вблизи рабочей частоты (б)

Как уже отмечалось, при резонансе амплитуды электрического и магнитного полей в сотни и тысячи раз превышают амплитуду возбуждающего поля. Максимальное значение амплитуд ограничивается тем, что с ростом напряженности магнитного поля возрастают и токи в стенках резонатора, что приводит к дополнительным потерям. В какой-то момент энергия, теряемая в стенах, сравняется с энергией возбуждения и установится состояние равновесия.

Таким образом, в резонаторе запасается некоторая энергия. Если в этот момент отключить источник возбуждения, то колебания в резонаторе продолжаются относительно долго, (это могут быть сотни периодов), пока вся запасенная энергия не израсходуется на нагрев стенок. Очевидно, чем меньше потери в резонаторе, т.е. чем выше его качество, тем на более высоком уровне ста-

билизируется амплитуда колебаний и тем дольше они будут происходить после отключения генератора. Для определения качества резонатора абсолютные значения амплитуд и времени затухания непригодны, поскольку они зависят от уровня входного сигнала. Удобнее в качестве характеристики резонатора использовать отношение запасенной энергии к величине подводимой мощности или, что то же самое, к мощности, теряемой в резонаторе за один период колебаний. Это отношение и называется добротностью.

Каждый резонатор способен работать на любой из принадлежащих ему резонансных частот или даже сразу на нескольких. Поскольку потери на разных частотах разные, добротность всегда определяется применительно к какой-то конкретной частоте. Обычно это основная частота, но бывают специфические случаи, когда резонатор возбуждается на более высокочастотных видах колебаний. Как уже упоминалось, микроволновая печь — один из таких случаев.

Чем выше добротность, тем уже полоса частот, в которой возможно возбуждение резонатора, и тем больше амплитуда колебаний электромагнитного поля. Существует простая формула, устанавливающая связь между добротностью и шириной полосы рабочих частот:

$$Q = \frac{f}{\Delta f}$$

где Δf — ширина полосы на уровне половинной мощности.

Если нет потерь, то возбуждение резонатора возможно только на резонансной частоте. Шаг влево, шаг вправо — гибель для колебаний. Но резонатор без потерь — это некая идеальная абстракция наподобие непогрешимого Иисуса Христа. В реальной жизни потери и грехи всегда есть, хотя они могут быть очень незначительны. Добротность самых высококачественных резонаторов, работающих в условиях сверхпроводимости, может превышать 10 000. В большинстве вакуумных приборов СВЧ добротность составляет порядка 1000.

Добротность пустой камеры микроволновой печи на рабочих видах колебаний не превышает 100, поэтому полоса частот, на которой происходит ее возбуждение, более 25 МГц. Следовательно, камера может возбуждаться на видах, которые смещены относительно частоты магнетрона на 12.5 МГц в любую сторону и даже более. В качестве иллюстрации на рис. 1.12б показана амплитудно-частотная характеристика резонанса на частоте 2.44 ГГц. Из рисунка видно, что, несмотря на удаленность резонанса от частоты магнетрона, он будет успешно возбуждаться. То же самое относится и к другим близлежащим видам.

Замедляющие системы

Работа электровакуумных приборов СВЧ (в том числе магнетронов, используемых в микроволновых печах) основана на взаимодействии потока электронов с электромагнитным полем. Эффективность работы приборов часто зависит от длительности такого взаимодействия. При этом возникает проблема, связанная с тем, что никаким напряжением невозможно разогнать электроны до скорости света, с которой распространяются электромагнитные волны. Но если гора не идет к Магомету, значит, нужно Магомету идти к горе. Для устранения этого несоответствия были созданы различные устройства, которые позволяют либо замедлить распространение электромагнитных волн, либо создать имитацию их замедления. В качестве простейшей замедляющей системы можно рассматривать волновод с диэлектрическим заполнением.

Однако такое решение не всегда приемлемо из-за относительно высоких потерь и небольшого коэффициента замедления. Например, если требуется замедлить скорость волны в 20 раз, то диэлектрическая проницаемость материала заполнения должна быть более 400. Такими параметрами обладают только сегнетоэлектрики, но они в то же время имеют и самые высокие потери, что исключает их использование. Из используемых на практике замедляющих систем наиболее простой и понятной является "спиральная" (рис. 1.13).

Волна в ней распространяется вдоль изогнутой в виде спирали центральной жилы коаксиального волновода, и поэтому ее фазовая скорость замедляется.

В качестве замедляющей системы могут служить связанные резонаторы, настроенные на одну частоту. Разумеется, если они связаны полем, а не бечевкой перед сдачей в утиль. Связь между резонаторами приводит к тому, что возникновение колебаний в одном из них инициирует колебания в соседних. Если из нескольких резонаторов создать цепочку, то регулировкой связи можно так подобрать фазы колебаний, что электрон, пролетающий вдоль этой цепочки, все время будет находиться в одной и той же фазе.

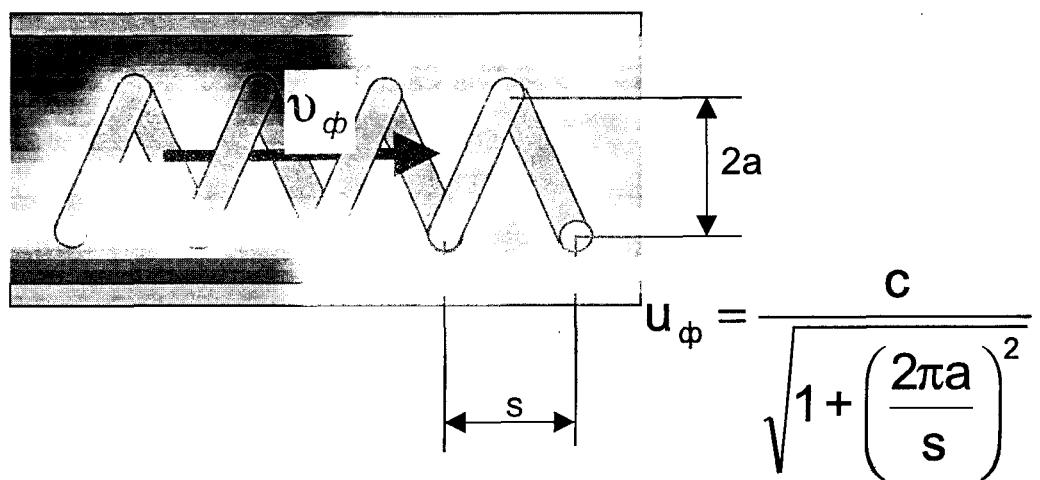


Рис. 1.13. Конструкция спиральной замедляющей системы

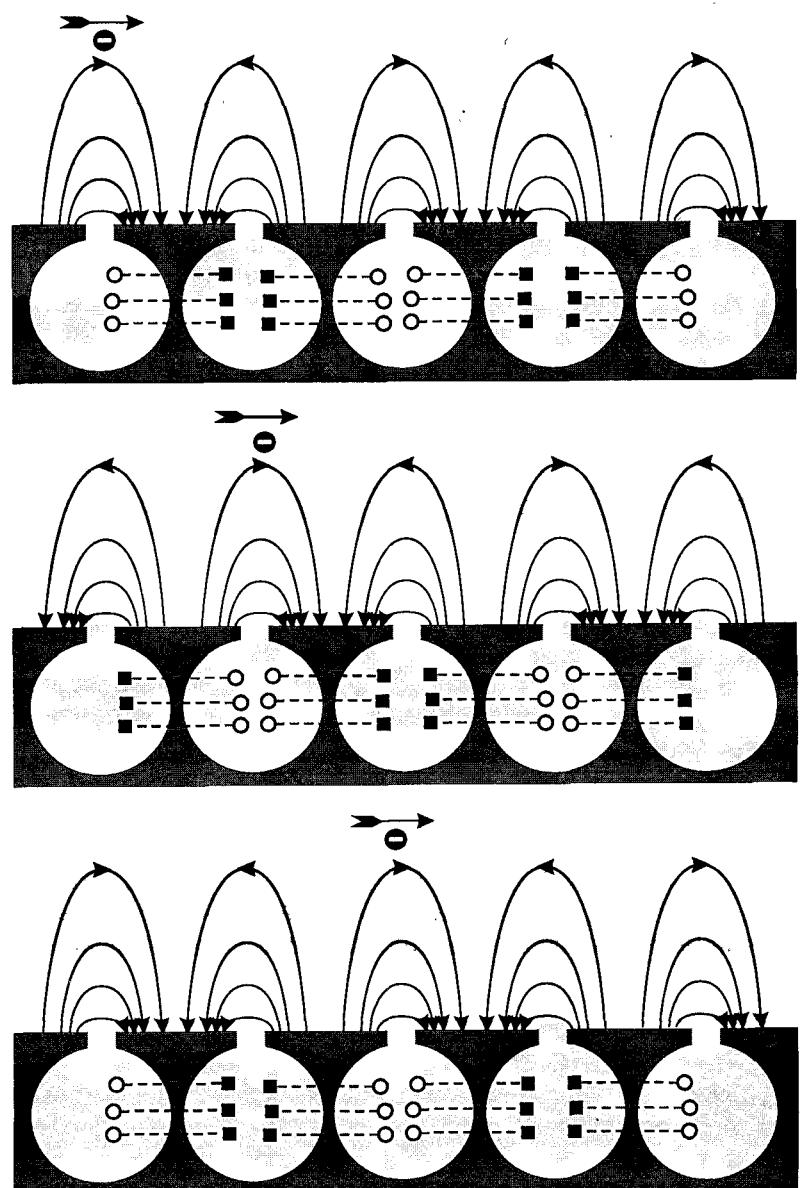


Рис. 1.14. Замедляющая система в виде цепочки связанных резонаторов

В качестве наглядной иллюстрации можно привести аналогию из спортивной жизни: гавайский абориген, занимающийся серфингом может продолжительное время двигаться вместе с волной, находясь на ее гребне. На рис. 1.14 представлен случай, когда за время, необходимое для преодоления электроном расстояния между соседними резонаторами, фаза колебаний изменяется на 180° , или на π радиан. Подобная замедляющая система, свернутая в кольцо, используется в качестве анодного блока магнетронов.

1.3. Магнетроны

Магнетроном называется генераторный, вакуумный, двухэлектродный прибор СВЧ, в котором движение электронов происходит в скрещенных электрическом и магнитном полях. Перед тем как ознакомиться с работой магнетрона, необходимо вспомнить законы взаимодействия электронов с электрическим и магнитным полями, чем мы в данный момент и займемся.

Движение электронов в электрическом поле

На рис. 1.15 показаны три основных случая движения одиночного электрона в однородном электрическом поле, созданном двумя плоскими электродами, обозначенными как анод (+) и катод (-).

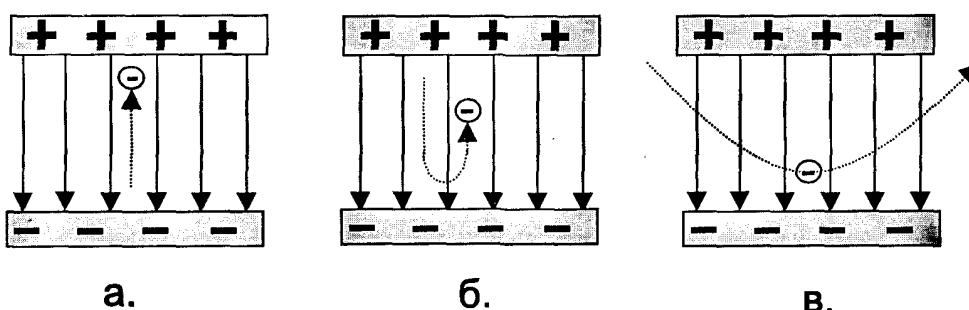


Рис. 1.15. Варианты движения электронов в постоянном электрическом поле

В первом случае (рис. 1.15а) электрон влетает в поле, отрываясь от отрицательно заряженного катода. Для такого электрона поле будет ускоряющим. Оно действует на электрон с постоянной силой и заставляет его двигаться с ускорением вдоль силовых линий поля. При этом, кинетическая энергия электрона возрастает. Если он попадает в ускоряющее поле, не имея начальной скорости, то, достигнув анода, он приобретает скорость, равную:

$$v = 6 \cdot 10^5 \sqrt{U}, \text{ м/сек},$$

где U — напряжение между анодом и катодом.

Как видим, скорость электрона не зависит от пройденного расстояния, а определяется исключительно разностью потенциалов. Как известно, энергия не возникает из ничего. Приобретенную кинетическую энергию электрон отбирает у поля. Переместив отрицательный заряд с катода на анод, электрон снизил заряд обоих электродов и тем самым уменьшил напряженность поля между ними.

Если электрон влетает в поле со стороны анода (рис. 1.15б), имея некоторую начальную скорость, то поле будет для него тормозящим. Скорость движения электрона и его кинетическая энергия в тормозящем поле уменьшаются, так как в данном случае работа совершается не силами поля, а самим электроном, который за счет своей энергии преодолевает сопротивление сил поля. Энергия, теряемая электроном, переходит к полю. Имея достаточный запас энергии, электрон может долететь до катода, несмотря на действие тормозящих сил поля. Но если, не долетев до противоположного электрода, электрон израсходует свою кинетическую энергию, его скорость окажется равной нулю, а затем электрон будет двигаться в обратном направлении. При этом поле возвращает ему ту энергию, которую он потерял при своем замедленном движении.

Теперь рассмотрим случай, когда электрон влетает в электрическое поле, имея начальную скорость, направленную под углом к силовым линиям поля (рис. 1.15в). Помимо изменения величины скорости электрона, будет изменяться и направление его движения, так что траектория движения электрона становится криволинейной. Электрон под действием сил поля отклоняется в сторону положительного потенциала.

Обычно для упрощения считают, что ток во внешней цепи вакуумного электронного прибора возникает в момент попадания электронов на анод. В действительности ток протекает и в процессе движения электронов от катода к аноду. Чтобы это уяснить, вспомним явление электростатической индукции.

Пусть имеется электрически нейтральный проводник (рис. 1.16а), к одному концу которого приближается отрицательный электрический заряд e . Тогда электроны, имеющиеся в проводнике, отталкиваясь зарядом e , смеются в сторону удаленного конца и там образуется отрицательный заряд. На ближнем к заряду e конце получится недостаток электронов, т.е. положительный заряд. Процесс перераспределения зарядов есть не что иное, как электрический ток, поэтому на основании нашего мысленного эксперимента можно сделать обобщающий вывод: если отрицательный электрический заряд приближается к проводнику или удаляется от него, то в этом проводнике возникает ток, по направлению совпадающий с направлением движения заряда. В электронных приборах функцию индуцирующего заряда выполняют электроны, движущиеся от катода к аноду, а возникающий при этом ток во внешней цепи называется наведенным.

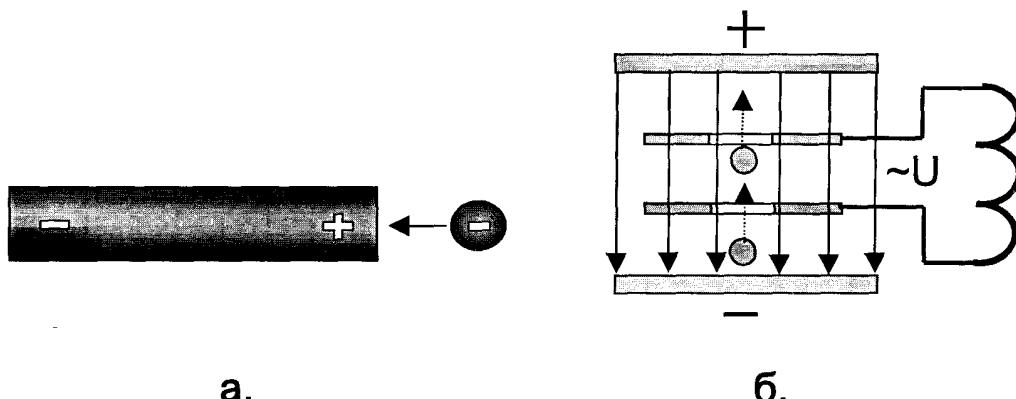


Рис. 1.16. Возникновение наведенных токов

В электронике СВЧ наведенные токи очень широко используются для возбуждения колебаний в резонаторах, которые являются составной частью большинства СВЧ приборов. В качестве примера рассмотрим электрическую схему на рис. 1.16б. Здесь в области между анодом и катодом помещены обкладки конденсатора с отверстием в центре, так чтобы электроны могли беспрепятственно проходить сквозь него. Во внешней цепи обкладки замкнуты на катушку индуктивности, образуя колебательный контур. Предположим, электроны вылетают с катода поочередно по одному. Тогда первый электрон, пролетающий мимо обкладок конденсатора, вызовет во внешней цепи наведенный ток и в контуре возникнут электрические колебания. Помимо постоянной составляющей электрического поля, между обкладками появится переменная составляющая. Если после этого выпустить еще один электрон, то в интересующей нас области он либо получит дополнительное ускорение, когда переменное поле будет совпадать по направлению с постоянным, либо наоборот — замедлится в случае противоположной ориентации полей. В последнем случае электрон отдаст часть своей энергии контуру, увеличив амплитуду его колебаний. Выпуская электроны таким образом, чтобы они каждый раз попадали в тормозящее электрическое поле контура, мы можем возбудить в нем колебания любой амплитуды, которую только обеспечивает его добротность. Если же электроны будут влетать в пространство между обкладками в тот момент, когда там ускоряющее поле, то второй электрон погасит колебания, возбужденные первым, и дальше все будет происходить в том же духе: один электрон будет совершать работу, другой — ее уничтожать. Почти как в жизни: один человек, обливаясь потом и проклиная всеобщую грамотность, очищает лифт от надписей, второй с не меньшим упорством их восстанавливает. Оба трудятся, но, работая в противофазе, национальное богатство страны не увеличивают.

Движение электронов в магнитном поле

Движущийся электрон представляет собой элементарный ток и поэтому испытывает со стороны магнитного поля такое же действие, как и проводник с током. Из электротехники известно, что на прямолинейный проводник с током, находящийся в магнитном поле, действует механическая сила, направленная под прямым углом к магнитным силовым линиям и к проводнику. Эта сила пропорциональна напряженности поля, величине тока и длине проводника, а также зависит от угла между проводником и направлением поля. Она будет наибольшей, если проводник расположен пер-

пендикулярно силовым линиям; если же проводник расположен вдоль линий поля, то сила равна нулю.

Когда электрон в магнитном поле неподвижен или движется вдоль его силовых линий, то на него магнитное поле вообще не действует. На рис.1.17 показано, что происходит с электроном, который влетает с начальной скоростью V_0 в равномерное магнитное поле, перпендикулярно его силовым линиям. Под действием сил со стороны магнитного поля его траектория искривляется, он начинает двигаться по дуге окружности. При этом его скорость и кинетическая энергия не изменяются. Радиус окружности, по которой движется электрон, определяется по формуле:

$$r = \frac{mv_0}{eH}$$

где m и e — масса и заряд электрона, V_0 — скорость электрона, H — напряженность магнитного поля.

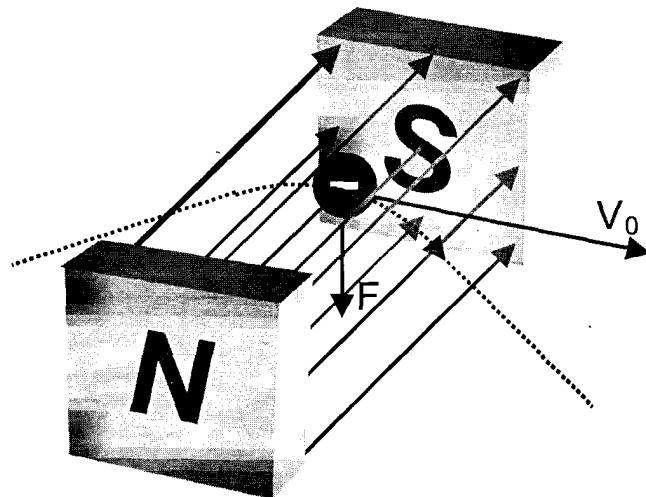


Рис. 1.17. Воздействие постоянного магнитного поля на движущийся электрон

Конструкция магнетрона

Устройство магнетрона показано на рис. 1.18. Он представляет собой вакуумный диод, анод которого выполнен в виде медного цилиндра, на внутренней стороне которого расположено четное число резонаторов. В магнетронах для микроволновых печей их, как правило, десять. Форма резонаторов может быть различной, но при этом они должны обладать следующими качествами:

1. Электрическое поле преимущественно сосредоточено в зазоре резонатора.
2. Все резонаторы сильно связаны между собой.
3. Высокая добротность.

В дальнейшем для простоты мы будем рассматривать только одну конструкцию магнетрона, которая типична для микроволновых печей. Резонаторы в этом случае представляют собой секторы цилиндра. По сравнению с другими конструкциями эта более технологична и более экономична. Четные и нечетные перегородки между резонаторами соединены между собой связками, назначение которых мы выясним позже. Катод представляет собой спираль из вольфрама, поверхность которого имеет шероховатость для увеличения эмиссии. Выводы катода через металлокерамический переход и высокочастотный фильтр подключаются к внешнему разъему. Промежуток между анодом и катодом, называемый пространством взаимодействия, с торцов ограничен металлическими пластинами, препятствующими выходу электронов и СВЧ из этого пространства. Для отбора энергии вблизи одного из резонаторов подключена магнитная петля связи, которая через отрезок коаксиального волновода соединена с излучателем. Магнитное поле в пространстве взаимодействия создается двумя кольцевыми постоянными магнитами и магнитопроводом, в качестве которого служат корпус и фланец. Для более интенсивного охлаждения магнетрона анодный блок окружен радиатором. Для снижения паразитного излучения в месте соединения магнетрона с внешней цепью имеется металлическая оплетка. СВЧ фильтр состоит из катушек индуктивности на ферритовом сердечнике и проходных конденсаторов.

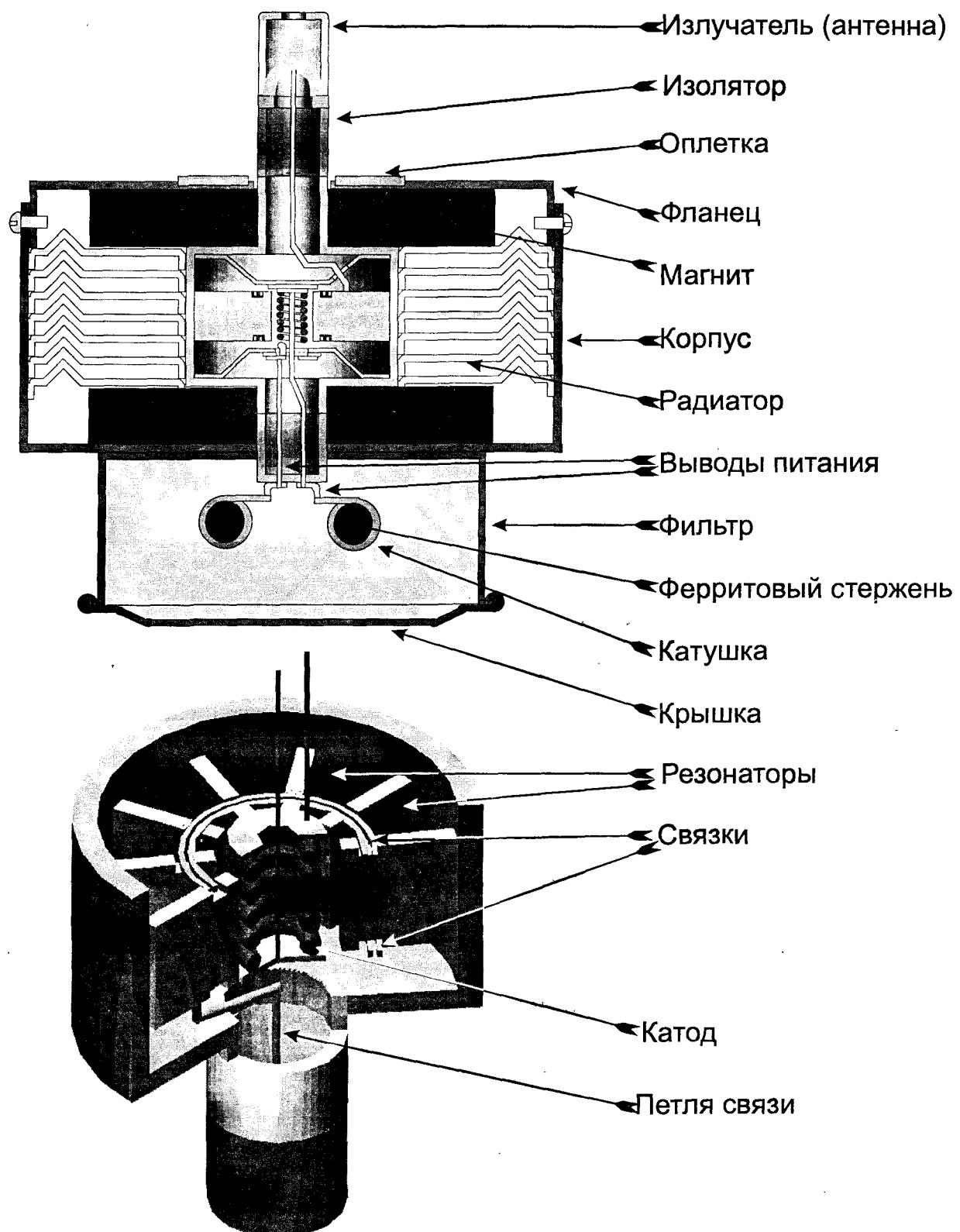


Рис. 1.18. Конструкция магнетрона микроволновой печи

Принцип действия магнетрона

Рассмотрим вначале движение электронов в магнетроне, предполагая, что колебаний в резонаторах нет. Для упрощения изобразим анод без резонаторов (рис. 1.19), как будто их забыли сделать.

Под влиянием ускоряющего электрического поля электроны стремятся лететь вдоль его силовых линий, т.е. по радиусам от катода к аноду. Но как только они набирают некоторую скорость, постоянное магнитное поле начинает искривлять их траектории. Так как скорость электронов постепенно нарастает, то радиус этого искривления постепенно увеличивается. Поэтому траектория электронов представляет собой не дугу окружности, а более сложную кривую — циклоиду. На рисунке показаны траектории электронов, вылетевших с катода с ничтожно малой начальной скоростью при разной напряженности магнитного поля H . Анодное напряжение во всех случаях одно и то же. Если магнитное поле отсутствует, то электрон летит строго по радиусу (траектория 1 на рисунке). При напряженности поля, меньшей некоторого критического значения H_{kp} , электрон попадает на анод по криволинейной траектории 2. Критическая напряженность поля соответствует более искривленной траектории 3. В этом случае электрон пролетает у самой поверхности анода, почти касаясь ее, и возвращается на катод. Наконец, если поле выше критического, то электрон еще более круто поворачивает обратно (кривая 4).

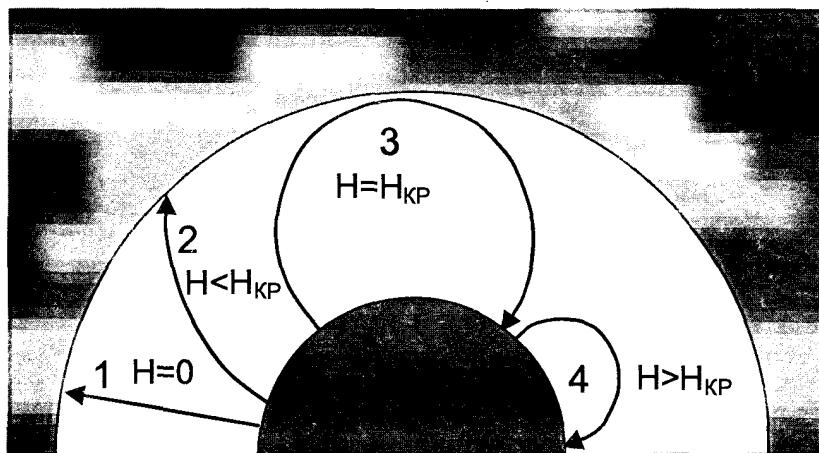


Рис. 1.19. Движение электронов в пространстве взаимодействия при различной индукции магнитного поля

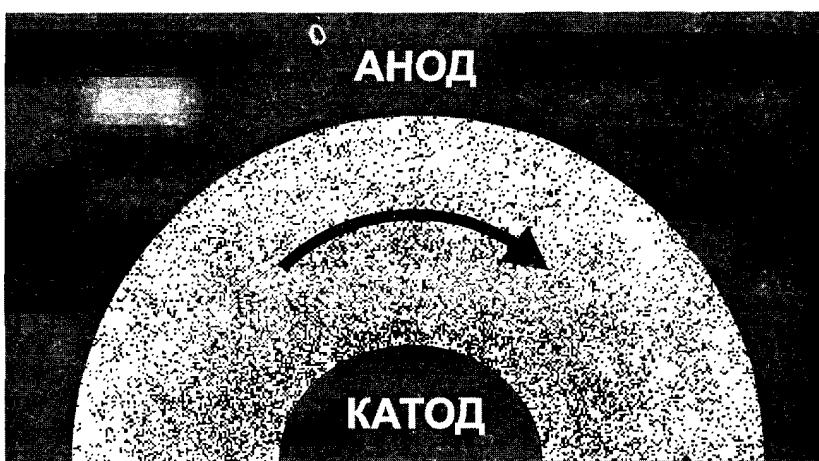


Рис. 1.20. Вращающееся электронное облако в пространстве взаимодействия

Магнетроны работают при напряженности поля, несколько большей критической. Поэтому электроны при отсутствии колебаний пролетают близко к поверхности анода на различных расстояниях от него в зависимости от начальной скорости. Поскольку одновременно движется очень большое количество электронов, можно считать, что в пространстве взаимодействия вращается электронное облако в виде кольца (рис. 1.20).

Скорость вращения электронного облака зависит от приложенного напряжения и поэтому может регулироваться. Чтобы при ее увеличении электроны не попадали на анод, одновременно необходимо увеличивать и напряженность магнитного поля.

Теперь вернем на место наши резонаторы. Все они сильно связаны между собой, так как магнитное поле каждого из них замыкается, проходя через смежные резонаторы (рис. 1.21).

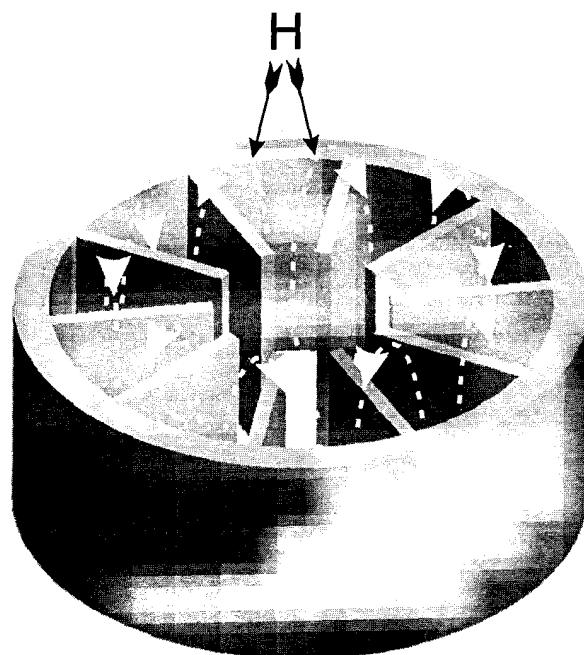


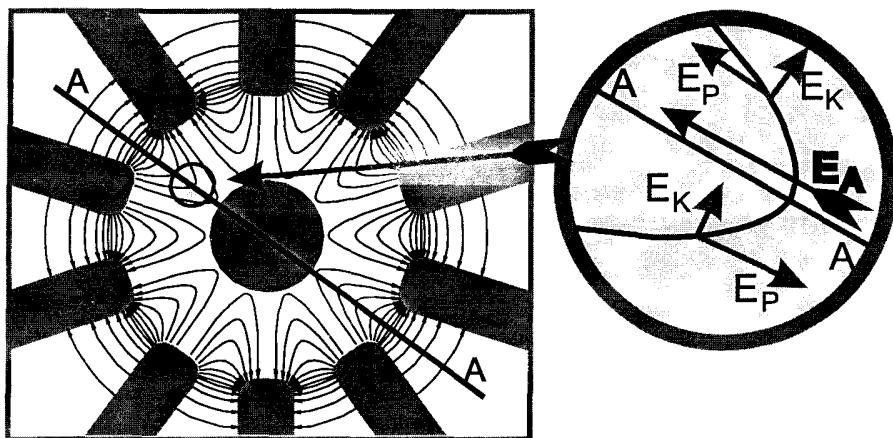
Рис. 1.21. Связь между резонаторами магнетрона с помощью магнитного поля

Переменное электрическое поле в магнетронных резонаторах сосредоточено в области щели, причем значительная его часть проникает в область взаимодействия, что имеет принципиальное значение в работе магнетрона. Движение электронного облака в пространстве взаимодействия будет наводить токи в резонаторах. Однако в начальный момент увеличение амплитуды колебаний будет сдерживаться тем, что движение электронов не синхронизировано, и в то время, как одни электроны будут возбуждать колебания, отдавая им часть своей кинетической энергии, другие будут эти колебания гасить. Кроме того, если сдвиг фаз в соседних резонаторах не синхронизирован со скоростью электронов, то один и тот же электрон, отдавая энергию одному резонатору, будет ее тут же отбирать у другого. Обычно для нормальной работы магнетрона требуется, чтобы фазы соседних резонаторов были смещены на 180° , т.е. на π радиан. Поэтому такой вид колебаний называется π — видом. Чтобы способствовать возбуждению этого вида и препятствовать возбуждению остальных, в магнетроне используются металлические связки, которые электрически соединяют между собой четные и нечетные резонаторы.

Предположим, что в какой-то момент времени в резонаторах случайным образом возникли колебания нужного нам вида (рис. 1.22). Попытаемся доказать, что при правильно заданных режимах магнетрона эти колебания будут усиливаться за счет автоматической группировки электронов.

В любой точке пространства взаимодействия мы можем рассматривать СВЧ поле как сумму двух составляющих: радиальной — направленной по радиусу от центра магнетрона, и перпендикулярной ей касательной составляющей. Рассматривая рис. 1.22, можно заметить следующую характерную особенность: во всем пространстве, находящемся под отрицательным сегментом, радиальная составляющая поля направлена к катоду, а во всем пространстве под положительным сегментом она направлена к аноду (поле считаем направленным в ту сторону, куда движется электрон под действием этого поля). Границами, разделяющими эти пространства, являются плоскости, проходящие через ось магнетрона и середины щелей. Обозначим одну из таких плоскостей буквами АА. Слева от этой плоскости радиальная составляющая будет ускорять электроны, поскольку она совпадает по знаку с постоянным анодным напряжением. Так как под влиянием магнитного поля направление скорости изменяется, то через некоторое время увеличение скорости в радиальном направлении превращается в увеличение скорости по направлению к плоскости АА.

Поэтому электроны, находящиеся под положительным сегментом, догоняют электроны, находящиеся в плоскости АА. Электроны, находящиеся под отрицательным полюсом, тормозятся радиальной составляющей СВЧ поля, поэтому их скорость в направлении движения электронного облака снижается. В результате образуются области электронных скоплений, по форме напоминающие спицы колеса, как это показано на рис. 1.23. Эти спицы врачаются с такой скоростью, чтобы за половину периода проходить расстояние от одной резонаторной щели до другой.



E_p - радиальная составляющая СВЧ поля
 E_k - касательная составляющая СВЧ поля
 E_A - поле, созданное анодным напряжением

Рис. 1.22. Распределение силовых линий переменного электрического поля в пространстве взаимодействия

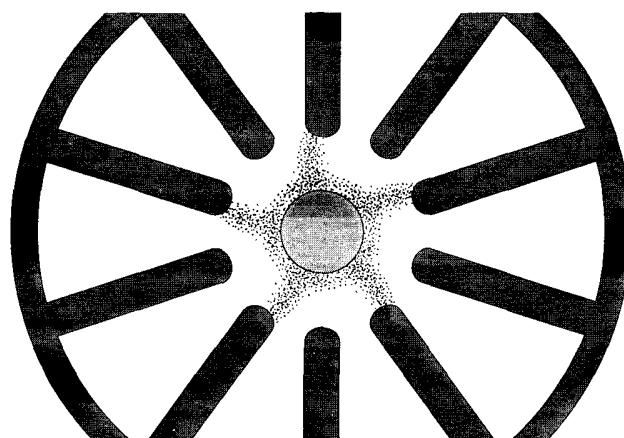


Рис. 1.23. Форма вращающегося электронного облака в работающем магнетроне

В этом случае электроны, находящиеся в спицах, пролетая над щелями резонаторов, могут постоянно попадать в тормозящее поле касательной составляющей и отдавать ему энергию, накопленную во время движения по радиальной составляющей. Таким образом, основная роль касательной составляющей СВЧ поля заключается в преобразовании кинетической энергии электронов в энергию колебаний, а основная роль радиальной составляющей заключается в преобразовании равномерного электронного облака в колесо от телеги.

Рассмотрим более подробно движение отдельного электрона в двух случаях: когда он находится в спице и когда он вне ее. Как уже отмечалось, при отсутствии СВЧ поля электрон, выплетевший с катода со скоростью, равной нулю, совершил круг почета вблизи анода и вновь вернется на катод. Причем скорость в конце пути будет той же, что и в начале, т.е. в нашем случае нулевой. При наличии СВЧ поля возможны два случая:

1. Допустим, электрон находится в области спицы. Тогда, выплетев с катода, он будет разгоняться анодным напряжением и за счет магнитного поля постепенно изменять направле-

ние движения. Влетев в тормозящее СВЧ поле, он отдаст ему часть своей кинетической энергии, и его скорость снизится. В результате ему не хватит оставшейся энергии, чтобы долететь обратно до катода. В какой-то момент он остановится, а затем вновь начнет движение к аноду под воздействием анодного напряжения. Все предыдущие процессы повторятся, за исключением того, что точкой начала движения будет не катод. В этом же духе будут происходить и последующие циклы, пока в конце концов электрон не доберется до анода. Таким образом, электрон на пути к аноду проходит по сложной траектории (рис. 1.24) несколько раз, отдавая свою энергию СВЧ полю.

2. Возможен, однако, и другой случай. Если при прочих равных условиях электрон вылетел с катода в момент, когда он находился между спицами, то он попадет в ускоряющее СВЧ поле, и поэтому ему после правого разворота в магнитном поле вполне хватит энергии врезаться в катод. Избыток кинетической энергии выделится в виде тепла, приводя к дополнительному разогреву катода.

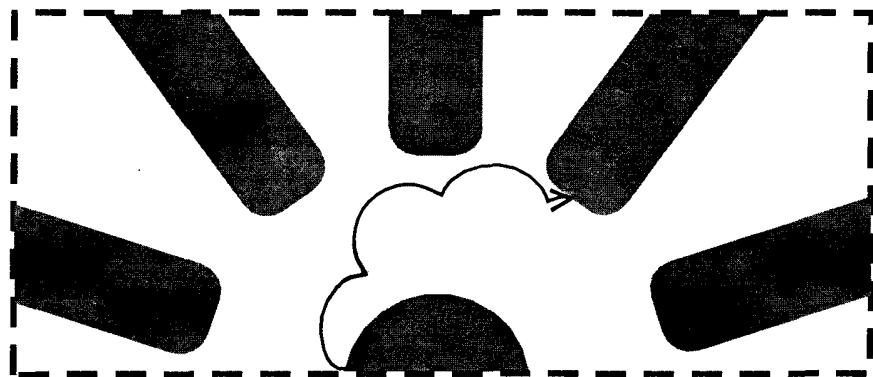


Рис. 1.24. Траектория электрона, находящегося в “спице”, при движении от катода к аноду

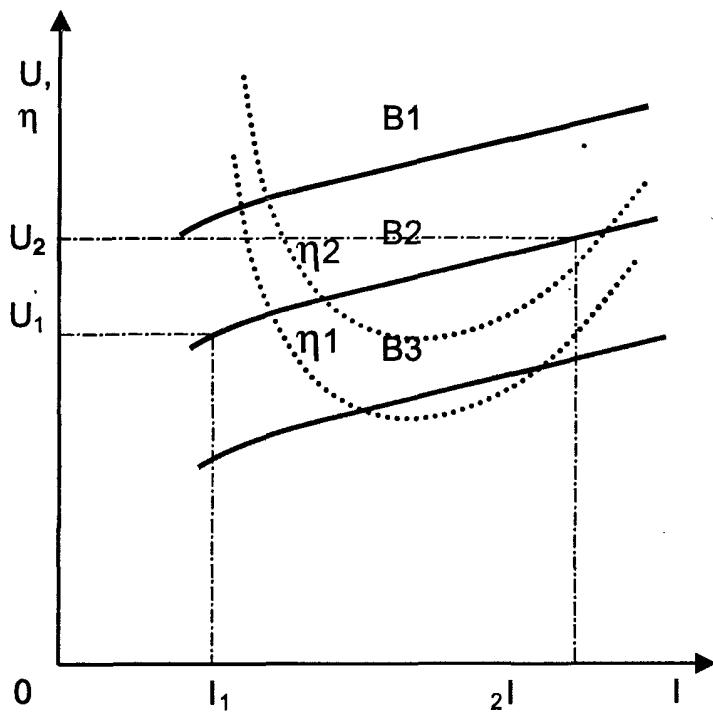


Рис. 1.25. Рабочие характеристики магнетронов

Характеристики магнетронов

Основными параметрами магнетронов являются: рабочая частота, выходная мощность, коэффициент полезного действия (КПД), рабочие токи и напряжения. Частота магнетронов для мик-

роволновых печей составляет 2450 МГц. Отклонение от этой частоты в ту или иную сторону может быть вызвано изменением анодного напряжения или параметрами нагрузки. Величина смещения частоты составляет несколько мегагерц. Мощность магнетронов лежит в пределах от 500 Вт, до 1 кВт, а КПД составляет от 50% у электронных динозавров до 85% в наиболее удачных конструкциях. Анодный ток магнетронов для микроволновых печей обычно составляет 250 — 300 мА. Рабочие напряжения некоторых типов магнетронов приведены в таблице 2.1.

В практике эксплуатации магнетронов широко пользуются графическими рабочими характеристиками, позволяющими в зависимости от конкретных условий установить требуемые значения мощности и КПД. Типичные рабочие характеристики приведены на рис. 1.25. По вертикальной координатной оси отложены значения анодного напряжения, по горизонтальной оси — значения анодного тока.

Для выражения взаимной зависимости нескольких параметров магнетрона на рабочие характеристики наносят ряд кривых, вдоль которых одна из представляемых величин остается неизменной. Эти кривые называются соответственно линиями постоянной мощности, КПД и магнитной индукции. На рисунке линии постоянной индукции сплошные, линии постоянного КПД — пунктирные.

Если изменять напряжение на магнетроне от значения U_1 до U_2 , оставляя неизменной магнитную индукцию B_3 , то рабочая точка, определяющая режим работы магнетрона, будет перемещаться вдоль линии постоянной индукции. Вследствие слабого наклона линий постоянной индукции при этом будет наблюдаться сильное изменение тока, протекающего через магнетрон (от I_1 до I_2). Из характеристик видно, что в пределах одной линии постоянной индукции ток изменяется практически от нуля до своего максимального значения при относительно небольшом изменении анодного напряжения. Поэтому на практике режим работы магнетрона удобнее контролировать не по напряжению на магнетроне, а по анодному току.

В областях очень малых и очень больших токов магнетрон работает неустойчиво: в области малых токов наблюдается низкая стабильность частоты магнетрона, а в области больших токов возможно появление "искрения" — кратковременных электрических пробоев внутри магнетрона, приводящих к быстрому разрушению катода.

КПД магнетрона возрастает при одновременном увеличении анодного напряжения и магнитной индукции, если при этом не нарушаются условия синхронизма. КПД магнетрона напрямую зависит от потерь, которые происходят двумя путями. Часть мощности теряется потому, что некоторые электроны прибывают на анодный блок магнетрона с большими скоростями и тратят свою энергию на его нагрев. Вследствие этого магнетрон разогревается до высокой температуры и необходимо принимать специальные меры для его охлаждения. Другая часть мощности теряется в резонаторах магнетрона, так как в них возникают СВЧ токи большой силы. Для снижения этих потерь необходимо повышать добротность резонаторов. Существуют и некоторые другие виды потерь, но их удельный вес невелик.

1.4. Взаимодействие микроволновой энергии с веществом

Для того чтобы понять за счет чего происходит нагрев в микроволновой печи, необходимо познакомиться с некоторыми свойствами вещества. Электромагнитное поле проявляет себя и как магнитное, и как электрическое, но, поскольку продукты, приготавливаемые в микроволновой печи, являются диэлектриками, воздействие магнитного поля на них пренебрежимо мало и его можно не учитывать. Диэлектрические свойства материалов могут интересовать нас по двум причинам. Во-первых, приготавливаемые продукты должны максимально поглощать СВЧ энергию, в противном случае возможно ее отражение обратно в магнетрон со всеми вытекающими последствиями. Во-вторых, в камере микроволновой печи имеются диэлектрические детали конструкции (СВЧ-окна, поддоны и т.д.), которые не должны подвергаться нагреву под воздействием микроволновой энергии.

Диэлектриками принято называть вещества, основным электрическим свойством которых является способность к поляризации и в которых возможно существование электрического поля. Такое поле может длительно сохраняться лишь в средах, плохо проводящих электрический ток.

Электропроводность — способность проводить электрический ток — обусловлена наличием в веществе свободных носителей заряда — электрически заряженных частиц, которые под воздействием внешнего электрического поля направленно перемещаются сквозь толщу материала,

создавая ток проводимости. Параметром вещества, количественно определяющим его электропроводность, является удельное объемное сопротивление ρ , измеряемое в омах на метр ($\Omega \cdot \text{м}$).

Носителями заряда в диэлектриках могут быть ионы, электроны и молионы — заряженные коплоидные частицы. У реальных диэлектриков $\rho=107$ — $1018 \Omega \cdot \text{м}$, что практически означает отсутствие протекающего через них тока.

Параметром диэлектрического материала, определяющим его способность противостоять пробою, является электрическая прочность E_p — напряженность электрического поля в диэлектрике, при достижении которой происходит его пробой. Механизм пробоя диэлектриков может иметь различный характер. Основными видами пробоя твердых диэлектриков являются электрический и тепловой. Электрический пробой представляет собой разрушение диэлектрика силами электрического поля и сопровождается образованием электронных лавин. Тепловой пробой обусловлен нагревом диэлектрика до критической температуры вследствие диэлектрических потерь, при нарушении в диэлектрике теплового равновесия. Электрическая прочность диэлектриков при тепловом пробое составляет 1 — 10 кВ/мм , при электрическом — примерно 100 — 1000 кВ/мм .

Помимо удельного объемного сопротивления, для краткости обычно называемого удельным сопротивлением, для твердых диэлектриков в качестве параметра вводят также удельное поверхностное сопротивление ρ_s . Очень часто пробой диэлектрика происходит именно по поверхности, особенно при работе в загрязненных или увлажненных средах.

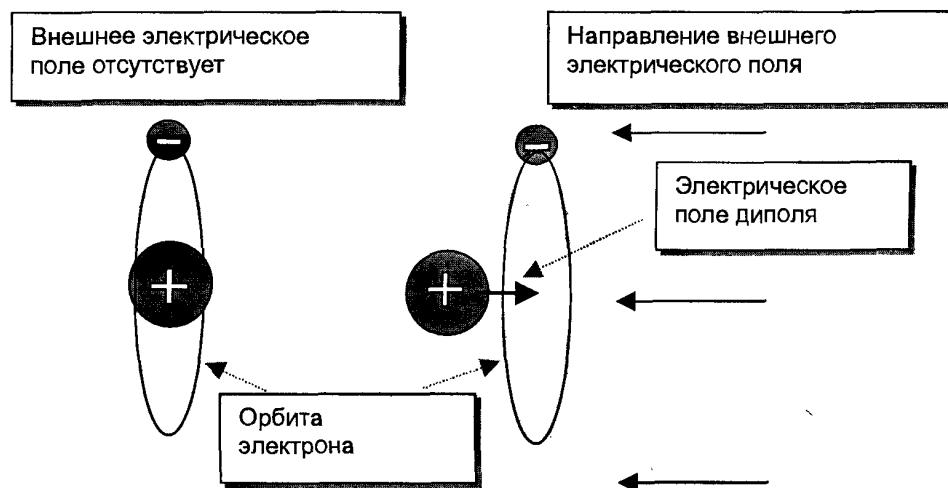


Рис. 1.26. Смещение электронной орбиты под воздействием электрического поля

Одним из важнейших параметров диэлектрических материалов является диэлектрическая проницаемость. Различают относительную диэлектрическую проницаемость ϵ_r (прежде ϵ) и абсолютную диэлектрическую проницаемость $\epsilon_r \epsilon_0$ (ϵ_0 — электрическая постоянная или, по старой терминологии, диэлектрическая проницаемость вакуума, равная $8.854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$).

По физическому смыслу диэлектрическая проницаемость — количественная мера интенсивности процесса поляризации. Поляризация представляет собой смещение связанных зарядов под действием внешнего электрического поля. Основными видами поляризации являются электронная, ионная и дипольная.

Электронная поляризация — упругое смещение электронных орбит относительно ядер в атомах и молекулах под действием внешнего электрического поля. В качестве примера можно рассмотреть поляризацию атома водорода, состоящего из положительно заряженного ядра и вращающегося вокруг него электрона. Если поле отсутствует, то центр, вокруг которого вращается электрон, совпадает с центром ядра и, соответственно, заряды полностью нейтрализуют друг друга. В присутствии электрического поля электрон смещается относительно ядра, как это показано на рис. 1.26, центр вращения электрона и центр ядра расходятся в пространстве и образуется диполь. Электронная поляризация происходит во всех диэлектриках независимо от присутствия в них других видов поляризации.

Ионная поляризация — это упругое смещение противоположно заряженных ионов в узлах кристаллической решетки. Присутствует в кристаллических веществах. Ионная и электронная поляризации происходят без потерь энергии.

Дипольная поляризация характерна для полярных диэлектриков. Полярные молекулы имеют несимметричное строение. Центры тяжести разноименных зарядов у них не совпадают, и поэтому в отсутствие внешнего электрического поля эти молекулы представляют собой диполи. Характерным представителем дипольных диэлектриков является вода, молекула которой показана на рис. 1.27.

Молекула воды состоит из атома кислорода и двух атомов водорода. Связь между атомами осуществляется за счет того, что электрон каждого из атомов водорода образует пару с одним из атомов кислорода, которая является общей для обоих атомов. Поскольку размеры и свойства атомов водорода и кислорода различны, наличие такой пары приводит к смещению центров положительного и отрицательного зарядов относительно друг друга. Дипольный момент возникает из-за того, что оси между центрами атомов водорода и центром атома кислорода не совпадают. Угол между ними составляет примерно 105° . Этот, на первый взгляд, незначительный факт имеет далеко идущие последствия. Свойства воды как растворителя объясняются главным образом существованием у ее молекулы дипольного момента. Этот момент играет важную роль и в химических реакциях, происходящих в присутствии воды. Трудно вообразить, на что был бы похож мир, если бы атомы в молекуле воды располагались по прямой линии, как в некоторых других веществах. Скорее всего, наблюдать это было бы некому.

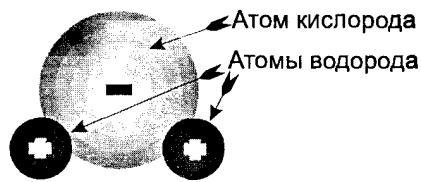


Рис. 1.27. Молекула воды

Свойства диэлектриков, состоящих из полярных молекул, существенно отличаются от диэлектриков с другими видами поляризации. Относительная диэлектрическая проницаемость неполярных жидкостей близка к 2, в то время как для воды она равна примерно 80. Сущность дипольной поляризации состоит в повороте диполей в направлении электрического поля. При отсутствии внешнего электрического поля молекулы полярного диэлектрика, находящиеся в хаотическом тепловом движении, ориентированы произвольным образом (рис. 1.28а) и какое-либо выделенное направление отсутствует. Ситуация изменится, если диэлектрик поместить в электрическое поле. Электростатические силы будут стремиться развернуть диполи вдоль силовых линий. В результате дипольные молекулы частично ориентируются вдоль поля, причем степень их ориентации будет зависеть от напряженности приложенного поля.

В идеальном диэлектрике отсутствуют свободные носители зарядов, поэтому его суммарный заряд всегда равен нулю. При помещении диэлектрика во внешнее электрическое поле за счет ориентации диполей вдоль силовых линий на противоположных сторонах диэлектрика образуются нескомпенсированные заряды, которые создают внутреннее поле, по направлению обратное приложенному (рис. 1.28б). В результате суммарное поле в диэлектрике оказывается меньше, чем поле в свободном пространстве, при прочих равных условиях.

Таким образом, диэлектрическую проницаемость можно рассматривать как меру, характеризующую степень снижения напряженности электрического поля в диэлектрике по сравнению с вакуумом. Однако с точки зрения микроволновой техники более существенным является то, что скорость распространения электромагнитных волн в веществе пропорциональна $\sqrt{\epsilon}$. Для пояснения этого факта и вытекающих последствий рассмотрим картинку на рис. 1.29.

Электромагнитная волна распространяется по волноводу со скоростью V_0 и на некотором участке попадает в область, заполненную диэлектриком. В результате ее скорость уменьшается в $\sqrt{\epsilon}$ раз, что приводит к такому же сокращению длины волны. Волна в диэлектрике как бы сжимается в продольном направлении. При этом энергия электромагнитного поля, запасенная на участках, ограниченных длинами L_1 и L_2 , одна и та же, поскольку размеры участков на рисунке выбраны таким образом, чтобы на них умещалась ровно одна длина волны. Из этого можно сделать следующий качественный вывод: чем выше диэлектрическая проницаемость вещества, тем больше плотность запасаемой в нем электромагнитной энергии. Количественные оценки более сложны и зависят от типа волны, формы диэлектрика и т.д., но, поскольку при ремонте микроволновой печи эти знания вряд ли помогут, скорее наоборот, только окончательно запутают, мы в эти дебри углубляться не будем.

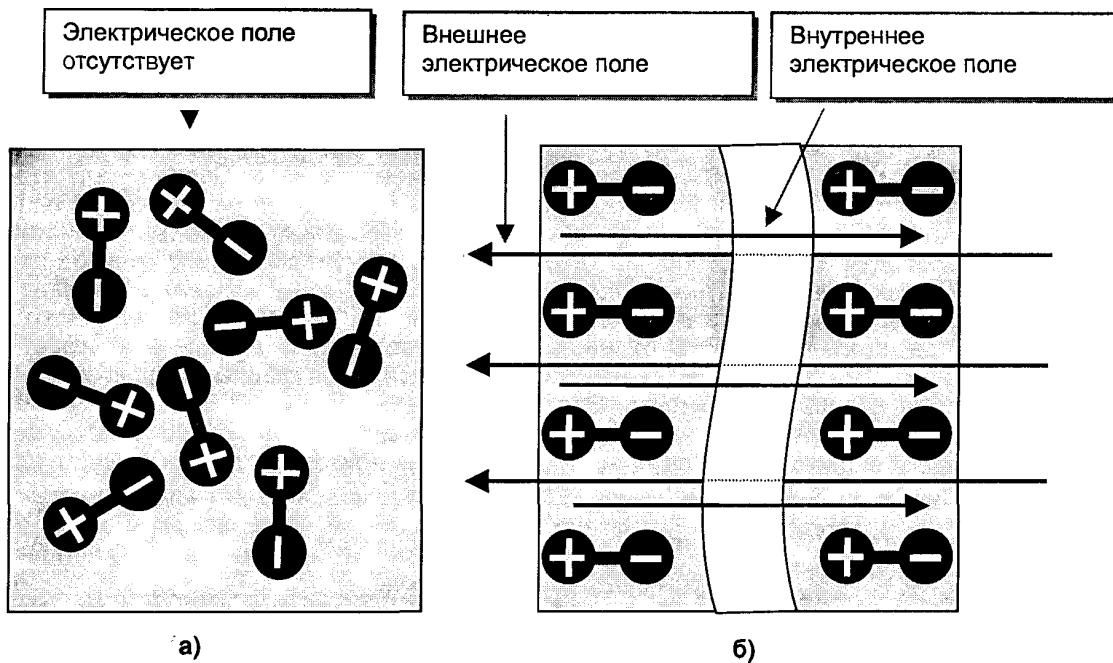


Рис. 1.28. Дипольная поляризация диэлектрика под воздействием внешнего электрического поля

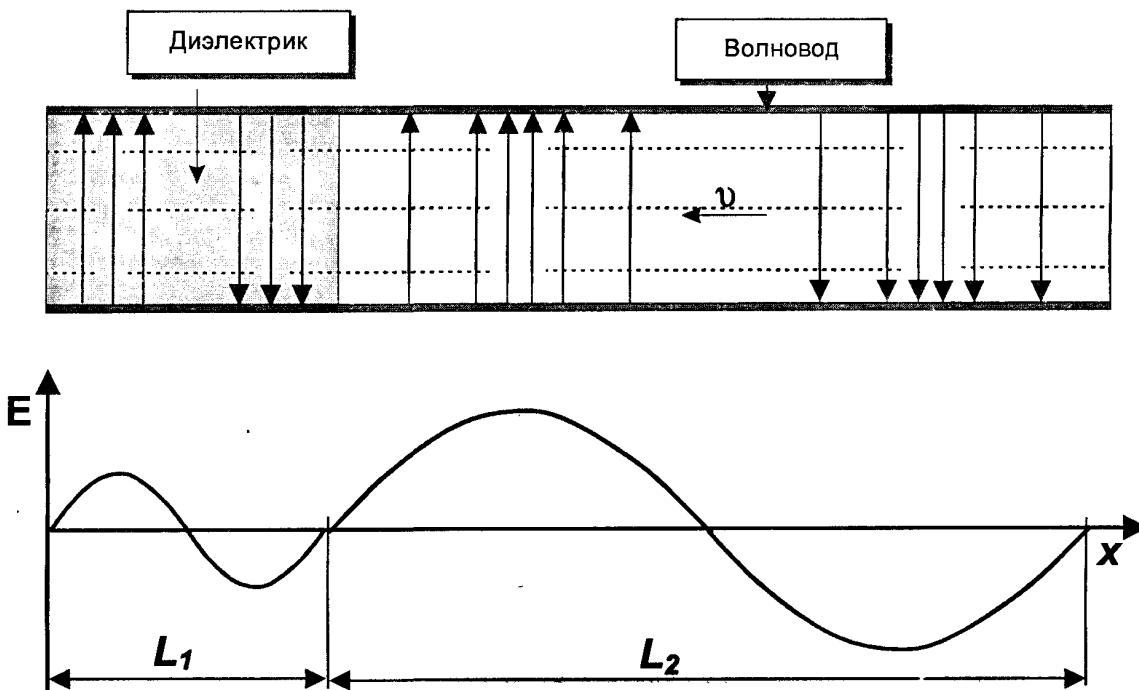


Рис.1.29. Изменение характеристик поля в волноводе при его заполнении диэлектриком

Может показаться, что возникает некоторое противоречие в полученных выводах: с одной стороны, из-за поляризации, амплитуда поля в диэлектрике уменьшается, а с другой — возрастает запасенная энергия. Но это противоречие кажущееся. В подтверждение этих слов приведем пример из электростатики. Если между обкладками обычного конденсатора поместить диэлектрик, то его емкость, а соответственно и запасенная энергия возрастут. В то же время напряженность поля между обкладками уменьшится. Теоретически волновод можно представить в виде эквивалентной схемы, состоящей из набора индуктивностей и емкостей, и поэтому приведенный пример с конденсатором не пустая абстракция, а вещественное доказательство.

Поляризация диэлектрика приводит к изменению напряженности электрического поля не только внутри него, но и снаружи. Рассмотрим, как это происходит. Предположим, между обкладками заряженного конденсатора помещен диэлектрический шар (рис.1.30а). В результате поляризации, вблизи его полюсов образуются электрические заряды, компенсирующие поле внутри диэлектрика. Но эти же заряды создадут и внешнее электростатическое поле, как это показано на рис.1.30б. Поэтому вне шара, как и внутри него, электрическое поле будет складываться из поля, которое существовало бы в отсутствие шара и поля образованного зарядами поляризованного диэлектрика. Результатирующая картина поля показана на рис.1.30в. Внешне все выглядит так, как будто силовые линии поля втягиваются в диэлектрик. Иногда бывает удобно считать, что чем выше ϵ_r , тем сильнее происходит втягивание силовых линий внутрь диэлектрика. Но при этом полезно не забывать, что на самом деле этого, конечно, не происходит. Все это не более, чем своеобразный электромагнитный мираж.

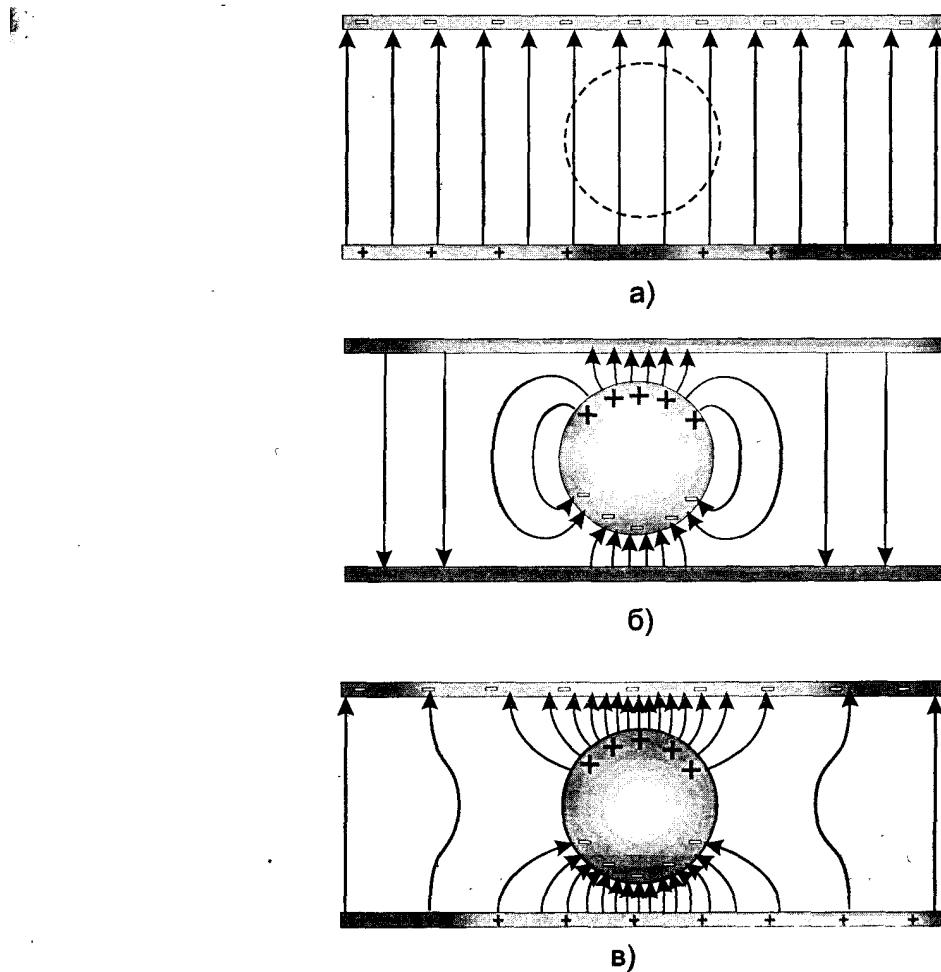


Рис.1.30. Изменение электрического поля конденсатора при помещении между его обкладками шара из полярного диэлектрика

Мы рассмотрели влияние диэлектрика на электростатическое поле конденсатора. То же самое происходит и в динамике, в СВЧ устройствах, с той лишь разницей, что амплитуда полей постоянно меняется. (В некоторых материалах, СВЧ все же вносит свою специфику. Это проявляется в наличии гистерезиса, явления при котором поле диполя отстает по фазе от внешнего поля.)

Еще одним важным параметром диэлектрических материалов являются диэлектрические потери. Они служат для определения электрической мощности, затрачиваемой на нагрев диэлектрика, находящегося в электрическом поле.

В справочной литературе для характеристики способности диэлектрика поглощать энергию переменного электрического поля используют тангенс угла диэлектрических потерь $\tan\delta$. Столь замысловатый термин используется потому, что непосредственно входит в формулу для рассеиваемой в диэлектрике мощности, и поэтому удобен при технических расчетах. Физический смысл $\tan\delta$ состоит в следующем: в случае диэлектрика без потерь ток в емкостной цепи опережает напряже-

ние на угол 90° . Наличие потерь приводит к сдвигу фазы между током и напряжением, и угол между ними становится меньше 90° на величину δ . Количественно потери оказываются пропорциональны $\operatorname{tg}\delta$, отсюда и удобство использования этой величины.

Рассмотрим два основных вида диэлектрических потерь.

1. Потери на электропроводность обнаруживаются в диэлектриках, имеющих низкое удельное объемное сопротивление. К таким диэлектрикам, в частности, относится вода. Химически чистая вода считается хорошим диэлектриком, но в природе она чистой не бывает. (Для этого вовсе не обязательно, чтобы в ней мыли сапоги). Вода является прекрасным растворителем и поэтому всегда содержит массу примесей. Известно, что в морской воде содержится вся таблица элементов Менделеева, включая и те элементы, о существовании которых он только догадывался. Поэтому электропроводность воды определяется не столько молекулами самой воды, сколько содержащимися в ней примесями, которые могут диссоциировать на положительно и отрицательно заряженные ионы. Под воздействием переменного электрического поля ионы начинают двигаться в такт изменяющемуся полю, попутно расталкивая встречающиеся на пути молекулы воды и таким образом преобразуя электрическую энергию в тепловую. Причем концентрация примеси не обязательно должна быть высокой. Достаточно одного иона на тысячу молекул воды, чтобы вода перестала быть диэлектриком и перешла в разряд полупроводников. Вспомните пословицу о бочке меда и ложке дегтя: народная мудрость установила влияние примеси на вещество задолго до открытия его молекулярного строения.

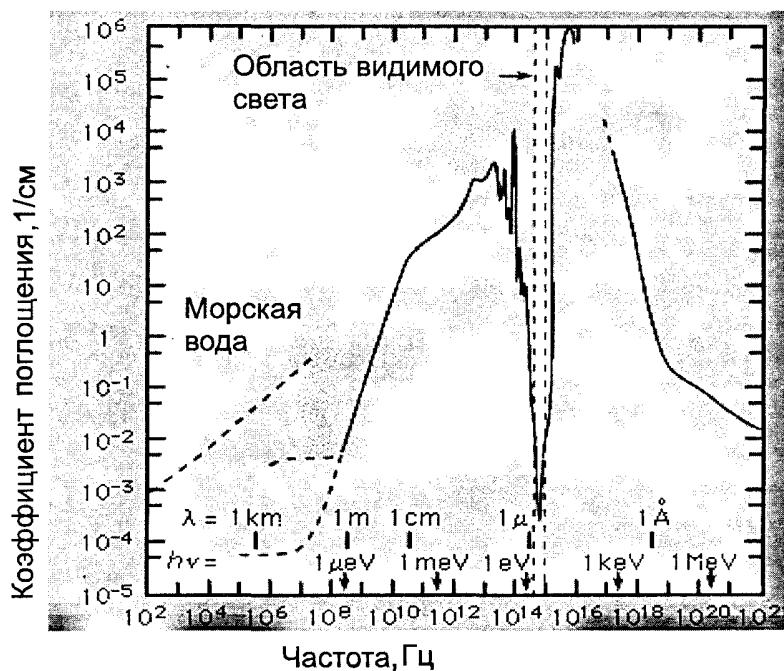


Рис. 1.31. Поглощение электромагнитного поля водой в зависимости от частоты

В дополнение можно привести наглядный пример из жизни: если в метро в час пик у одного из пассажиров возникнет серьезный стимул периодически бегать из одного конца вагона в другой, то температура на данном отрезке маршрута дойдет до кипения за очень короткое время.

2. Релаксационные потери обусловлены поворотом полярных молекул в направлении сиповых линий электрического поля. Каждый поворот требует некоторых затрат энергии, особенно если при этом мешают соседи, которых приходится расталкивать и которые, в свою очередь, норовят отплатить тем же. Возвращаясь к предыдущему примеру, немного изменим начальные условия: высадим неугомонного бегуна, а на каждого из оставшихся пассажиров оденем по два рюкзака, для большего сходства с молекулой воды, и заставим вращаться вокруг своей оси. Нетрудно предположить, что и в этом случае результатом будет повышение температуры. Поскольку ориентация поля меняется на противоположную дважды за период, то чем выше частота, тем чаще происходит выяснение отношений между молекулами и тем больше энергии превращается в тепло. Это продолжается до тех пор,

пока частота не превысит значения, при котором молекулы из-за своей инерции перестанут успевать полностью развернуться в течение одного полупериода. После этого наступает снижение потерь с ростом частоты, пока не вступят в силу другие механизмы возникновения потерь. Но эти области частотного спектра слишком далеки от интересующего нас диапазона, и поэтому мы их оставим без рассмотрения.

На рис. 1.31 приведена зависимость коэффициента поглощения α для воды во всем спектре электромагнитных частот. Как видим, на частоте работы микроволновой печи поглощение энергии близко к максимальному, что обеспечивает хорошее преобразование электромагнитной энергии в тепловую.

Диэлектрические потери, отнесенные к единице объема диэлектрика, называют удельными потерями. Их можно рассчитать по формуле:

$$p = E^2 \omega \epsilon_0 \operatorname{tg} \delta$$

где E — напряженность электрического поля, ω — круговая частота.

Из приведенного выражения следует, что потери в веществе определяются произведением диэлектрической проницаемости ϵ на $\operatorname{tg} \delta$. Это произведение иногда называют коэффициентом диэлектрических потерь. Чтобы представлять степень нагрева того или иного вещества в электрическом поле, необходимо знать его ϵ и $\operatorname{tg} \delta$. Указанные параметры некоторых веществ приведены в таблице 1.1.

Анализируя приведенные в таблице данные, легко определить материалы, которые можно использовать для изготовления вспомогательных деталей, находящихся внутри камеры. Например, фторопласт, полиэтилен, слюда — имеющие очень низкий коэффициент удельных потерь.

С другой стороны, несложно предсказать результат нагрева банки с трансформаторным маслом в микроволновой печи "Электроника", имеющей текстолитовую перегородку в верхней части камеры. Эта перегородка сгорит раньше, чем масло нагреется хотя бы на несколько градусов.

1.5. Влияние СВЧ излучения на биологические объекты

У многих людей в нашей стране термин "излучение" вызывает подсознательный страх и не-преодолимое желание держаться подальше от всего, что с этим связано. Возможно, это "синдром Чернобыля". Свою лепту в это вносит и сходство слов "радио" и "радиоактивность", хотя слово "радиоактивность" имеет своим корнем "радий" — химический элемент, в котором впервые было обнаружено явление радиоактивности. Поэтому имеет смысл "отделить зерна от плевел" и разобраться, как в действительности микроволновое излучение влияет на биологические объекты и какую опасность оно может представлять для человека.

Как мы уже знаем, микроволны — это вид электромагнитной энергии, занимающий по шкале частот положение между радиоволнами и инфракрасным излучением (рис. 1.1), и поэтому ему присущи некоторые свойства своих соседей. Ни тепло, ни радиоволны не наносят ущерба нашему здоровью, следовательно, нет особых причин ожидать этого и от микроволнового излучения.

Рассматривая шкалу электромагнитных частот, можно выделить две принципиально различные формы излучения на разных ее концах. Излучение волн с частотой больше, чем у видимого света называется ионизирующим, а если частота излучения меньше, чем частота видимого света, то такое излучение является неионизирующим. Для того, чтобы понять разницу между этими двумя видами излучения, необходимо разобраться во взаимодействии электромагнитных волн с веществом.

Все в природе состоит из атомов, мельчайших неделимых частичек вещества. "Атом" в переводе с греческого означает "неделимый". Если взять любой однородный предмет, к примеру железный трамвайный рельс, и последовательно распиливать его на все более мелкие кусочки, то в конце концов мы получим такой маленький кусочек, который является мельчайшим носителем вещества. Атом можно продолжать делить и дальше, на электроны, протоны и другие элементарные частицы, но тогда это уже будет не железо. Электрон железа ничем не отличается от электрона кислорода и поэтому не несет в себе никаких свойств вещества. Сочетания атомов различных элементов могут образовывать молекулы — мельчайшие частички вещества более сложной структуры. В этом случае разрушение вещества может наступить еще раньше, на этапе деления молекул на атомы.

Таблица 1.1

Диэлектрик	ϵ	$\operatorname{tg}\delta$
Вареный горох	9	0.5
Винипласт	4.0	0.02
Вода вблизи точки замерзания	87.8	—
Вода вблизи точки кипения	55.6	—
Вода при $t=20^{\circ}\text{C}$	81	0.11
Гетинакс	7.5	0.015
Капрон	4.5	0.06 — 0.1
Картофель	38	0.3
Касторовое масло	4.0	0.02
Кварц плавленый	3.8	$1 \cdot 10^{-4}$
Льняное масло	3.3	—
Метиловый спирт	32.6	—
Мороженая говядина при $t=-15^{\circ}\text{C}$	5.0	0.15
Мороженая свинина при $t=-15^{\circ}\text{C}$	6.8	1.2
Нейлон	4.6	0.04
Пластмассы Э1-340-02, Э2-330-02, Э8-361-63, Э9-342-73, Э10-342-63, Э11-342-63, Э15-121-02	7.5 — 9.5	0.08
Пластмассы Э3-340-65, Э4-100-30, Э5-101-30, Э6-014-30	6 — 8	0.01 — 0.012
Плексиглас	2.61	$8.4 \cdot 10^{-3}$
Поджаренная говядина при $t=24^{\circ}\text{C}$	28	0.2
Поджаренная свинина при $t=35^{\circ}\text{C}$	23	2.4
Полистирол	2.55	$0.5 \cdot 10^{-3}$
Полиэтилен	2.26	$0.4 \cdot 10^{-3}$
Сапфир	11	$0.26 \cdot 10^{-4}$
Слюдя	5.4	$0.3 \cdot 10^{-3}$
Стекло С5-1	3.8	$1 \cdot 10^{-4}$
Стекло С63-1	12	$131 \cdot 10^{-4}$
Текстолит	3.67	$6.0 \cdot 10^{-2}$
Трансформаторное масло	2.2	0.001
Фреон 215	2.76	6.0
Фторопласт-4 (тефлон)	2.0	$3.0 \cdot 10^{-4}$
Эбонит	2.67	$6.0 \cdot 10^{-3}$
Электрофарфор	5 — 8	0.025
Эпоксидный компаунд Д1	4	0.02
Этиловый спирт	24.3	—

Обратим внимание, что всякое деление вещества требует затрат определенной энергии. Так же, как при отрезании от рельса небольшого кусочка железа необходимы физические усилия, отделение электрона от атома тоже требует приложения энергии извне. Отличие заключается в том, что если рельс можно пилить долго и с перекурами, то отделение электрона от атома требует однократного действия. Нельзя это сделать в два этапа, как нельзя перепрыгнуть через пропасть, используя тройной прыжок.

Подобно веществу электромагнитное поле также состоит из элементарных волновых пакетов — квантов. Не может существовать поле с энергией меньше, чем энергия кванта. Однако кванты волн разных частот могут очень сильно отличаться друг от друга, поскольку энергия кванта пропорциональна частоте излучения. Например, увеличив частоту в десять раз, мы во столько же раз увеличиваем энергию квантов электромагнитного поля. Сущность ионизирующего излучения заключается в том, что энергия кванта оказывается достаточной для того, чтобы оторвать электрон от атома. Необходимая для ионизации энергия для разных веществ разная. Поэтому и энергия квантов, а соответственно, и частота излучения при ионизации различных веществ требуется разная. Некоторые вещества способны ионизироваться уже при инфракрасном излучении и видимом свете. Этот эффект используется в различных фотоэлементах, фототранзисторах и т.д. Ионизация биологической ткани может происходить при частотах, примерно в десять раз превышающих частоту видимого света. Примером такого излучения может служить рентгеновское, представляющее опасность для человека.

Биологическая ткань состоит из довольно сложных молекул, каждая из которых может содержать тысячи атомов. Тем не менее каждая ионизированная молекула является дефектной, поскольку ее свойства могут заметно отличаться от свойств обычной молекулы. При длительном воздействии ионизирующего излучения количество таких молекул накапливается, что может привести к необратимым результатам. Из-за способности к накапливанию дефектных молекул даже очень слабое ионизирующее излучение может представлять серьезную опасность.

Квант энергии неионизирующего излучения не способен оторвать электрон от атома и поэтому не представляет угрозы для биологической ткани. Особо подчеркнем, что мощность излучения в этом случае не имеет значения, так как если для ионизации молекулы нужна определенная энергия, то этого не смогут сделать и миллион квантов с вдвое меньшей энергией. Микроволновое излучение по шкале частот расположено ниже инфракрасного, поэтому никакого ионизирующего воздействия на вещество не оказывает. Однако это вовсе не означает, что оно вообще не представляет опасности. Любой вид энергии несет в себе определенную угрозу, и риск тем больше, чем выше уровень энергии и время ее воздействия. Например, электрическая батарейка и пиния высоковольтной передачи заключают в себе один и тот же вид энергии, но степень риска при работе с ними изменяется от пренебрежимо малой до смертельно опасной. Можно получать удовольствие, принимая солнечные ванны, но, если переусердствовать, это может закончиться ожогом или солнечным ударом. Микроволновое излучение здесь не исключение.

Работая с СВЧ оборудованием мощностью 100 Вт, у которого сломаны все защиты и блокировки, самое худшее, что может случиться, эквивалентно нагреву тканей тела нагревателем такой же мощности. Это может быть неприятно, но не смертельно. Аналогичная ситуация с оборудованием мощностью 100 кВт, превратит субъекта, оказавшегося в неподходящее время в неподходящем месте, в пепел в течение нескольких минут. Единственным утешением для скорбящих родственников будет экономия на крематории.

Как правило, не бывает четкой границы между опасным и безопасным уровнем мощности. Считающееся вполне безопасным напряжение 36 В, при определенных условиях может вызвать поражение электрическим током. Поэтому в качестве стандарта безопасного излучения принимается такое, которое ни при каких условиях не может нанести вреда.

Влияние СВЧ полей на биологические объекты до конца еще не изучены. Имеются сведения о положительном воздействии микроволн на семена сельскохозяйственных культур. Существуют медицинские аппараты, использующие микроволновую энергию для лечения различных заболеваний. В печати были сообщения о том, что так называемое биополе есть не что иное, как микроволновое излучение с длиной волны около 8 мм, (впрочем за достоверность этого автор поручиться не может). Основным биологическим воздействием микроволнового излучения в настоящее время считается повышение температуры тела за счет поляризационных эффектов. Для количественной оценки уровня излучения используется параметр "плотность мощности", измеряемый в ваттах на квадратный сантиметр. Чувствительность человеческого тела к микроволновому излучению зависит от его частоты. Излучение миллиметрового диапазона и более высокочастотное почти полно-

стью поглощается кожным покровом и может ощущаться при плотности мощности в несколько милливатт на квадратный сантиметр.

На частоте работы микроволновой печи (2450 МГц) проникновение излучения внутрь тела составляет несколько сантиметров и производимый им нагрев чувствуется при плотности мощности 20 — 50 мВт/см² в течение нескольких секунд. Опасность такого излучения заключена в возможности получения внутренних ожогов, которые могут быть гораздо более опасны, чем обычные ожоги, поскольку организм к ним менее приспособлен. Особенно чувствительны к таким ожогам глаза и яичники, поскольку низкий поток крови в этих частях тела практически не рассеивает тепло. Заметим, что необратимые изменения в организме могут наступать при достижении внутренними тканями тела температуры выше 43°C. Минимальная плотность излучения, при которой это может произойти, составляет 20 мВт/см². Например, плотность излучения 100 мВт/см² в течение продолжительного времени может служить причиной глазной катаракты и временного бесплодия. При плотностях мощности, в десять и более раз меньшими, излучение считается полностью безопасным. Например, плотность излучения от телевизионной вышки, фактически производящей такое же воздействие на организм человека, как СВЧ, в некоторых местах составляет единицы милливатт на квадратный сантиметр, однако мы его никак не ощущаем.

В настоящее время в мире существуют два основных стандарта на уровень безопасного излучения. Один из них разработан Американским Национальным Институтом Стандартов (ANSI) и предлагает считать безопасным излучение с плотностью мощности в 10 мВт/см². Для микроволновых печей стандартом является плотность мощности в 1 мВт/см² на расстоянии 5 см от печи.

Европейский стандарт (в том числе и российский) предполагает, что уровень плотности излучения не должен превышать 10 мкВт (0.01 мВт) на квадратный сантиметр на расстоянии 50 см. от источника излучения (рис. 1.32). Причиной такого расхождения стандартов послужили исследования, выполненные в Советском Союзе в 80-х годах, по нетепловому воздействию микроволн на живые организмы, в особенности на нервную систему. Зарегистрированы повышенная утомляемость и бессонница у людей, обслуживающих высокочастотное оборудование радио- и телевизионных станций. Нетепловое влияние наблюдалось также на энцефалограммах кроликов. Причины нетеплового воздействия на биологические объекты до конца не изучены; предполагается, что при этом происходят изменения в свойствах макромолекул и нервных мембран. Однако сразу оговоримся: при том уровне излучения, который допустим стандартом т.е. более чем в тысячу раз меньшим безопасного уровня с точки зрения теплового воздействия), влияние нетепловых эффектов не обнаружено. Попутно заметим, что плотность излучения от сотового телефона, примерно на порядок превышает излучение от микроволновой печи.

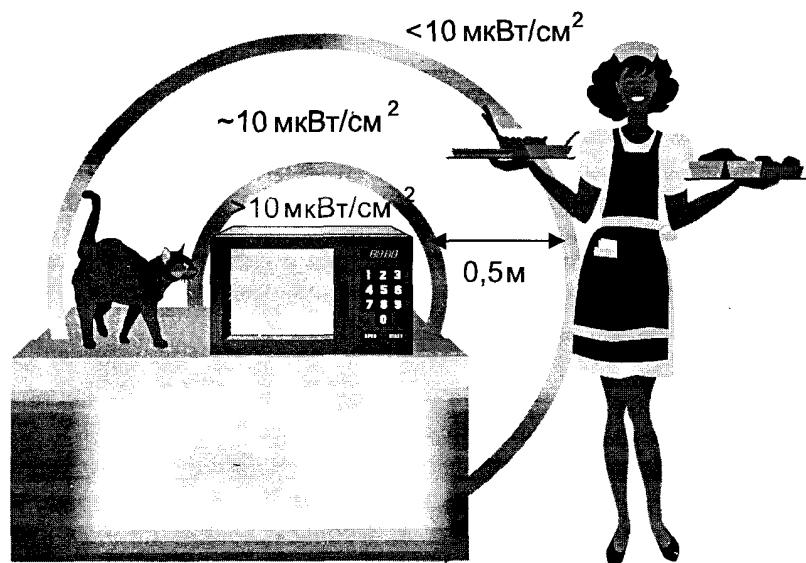


Рис.1.32. Уровень безопасной плотности излучения от микроволновой печи

Все выпускаемые печи удовлетворяют требованиям безопасности, а хорошие микроволновые печи имеют уровень излучения в десятки раз ниже допустимого. Однако некоторые микроволновые печи со временем могут превысить допустимые нормы плотности излучения, но к роковым последствиям, тем не менее, это не приводит (если только это не дыры в корпусе или дверце).

До сих пор мы рассматривали только негативное влияние микроволнового излучения на биологические объекты. Это может создать у читателя однобокое представление о предмете. Попробуем выровнять чашу весов, отметив некоторые преимущества приготовления пищи в микроволновой печи.

Поскольку микроволновое излучение обеспечивает очень быстрое приготовление пищи и нагрев ее происходит изнутри, уменьшается разрушение содержащихся в продуктах витаминов. В таблице 1.2 приведены примеры степени сохранения полезных витаминов и сравнение с другими способами приготовления пищи.

Таблица 1.2

Продукты	Витамины	В сыром виде	Микроволновая печь	Обжаривание	Кипячение	Электрическая печь
Шпинат	C	100%	82%	69%		
Капуста		100%	93%	73%		
Перец		100%	80%	79%		
Сладкий картофель		100%	88%		70%	35%
Печенные яблоки		100%	82%			35%
Бифштекс	B	100%	71%	68%		
Печеная свинина		100%	66%			64%

Углубленные лабораторные исследования показали, что микроволновое излучение обладает стерилизующим действием в отношении стафилококков, кишечных палочек и других микроорганизмов. Причина этого эффекта заключается в том, что температура внутри продуктов возрастает очень быстро при одновременном диэлектрическом нагреве протеинов микроорганизмов. Происходит так называемый "тепловой удар", отправляющий микроорганизмы в нокаут. В качестве иллюстрации на рис. 1.33 показано сравнение стерилизующего воздействия обычного и микроволнового нагрева на возбудителей сенной лихорадки.

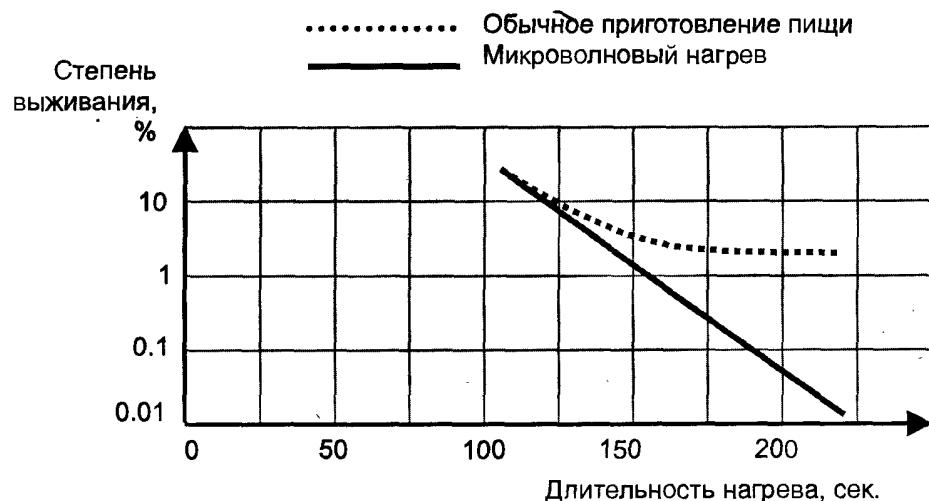


Рис. 1.33. Степень выживания возбудителей сенной лихорадки при обработке продуктов обычным способом и с помощью микроволнового нагрева

Как легко видеть из рисунка, эффект стерилизации при использовании микроволнового излучения в сотни раз выше, чем при обычных способах приготовления пищи.