

# СВЧ-камеры проходного типа и их применение в установках электромагнитной обработки материалов

Натан Фельдман (г. Новосибирск)

Рассмотрены волноводные СВЧ-камеры, реализующие различные процессы обработки материалов в СВЧ-электромагнитном поле, когда материал проходит через серию камер непрерывным потоком, пересекая каждую из них в плоскости, параллельной узкой стенке волновода. Определено взаимное расположение проходных щелей в волноводе, их длина, ширина, а также методы защиты входа и выхода камеры от паразитных электромагнитных излучений. Проанализированы методы измерения текущих диэлектрических характеристик материала.

Основное отличие волноводных камер проходного типа от резонансных камер состоит в том, что вся неизрасходованная в камере энергия выходит из неё и может быть использована в СВЧ-установке как для самого процесса электромагнитной обработки материала, так и для измерения характеристик процесса, проходящего в данной камере. Расход энергии в камере складывается из её полезных затрат (поглощение электромагнитной энергии обрабатываемым материалом) и из потерь энергии (поглощение энергии стенками камеры, отражение мощности материалом). Естественно, что уменьшение потерь энергии в камере является одной из основных задач её проектирования.

Как правило, СВЧ-установки, использующие волноводные камеры, строятся по принципу непрерывного движения

обрабатываемого материала. Движение материала через камеру возможно как вдоль оси волновода, так и перпендикулярно ей. Камеры, использующие движение материала вдоль оси волновода, используются в ограниченном количестве процессов. В них, как правило, обрабатывается сыпучий материал и требуется максимальная концентрация электромагнитной энергии [1]. Камеры с поперечным проходом материала имеют более широкое применение (сушка, разогрев, обжиг). Единственным ограничением здесь является минимальная возможная толщина слоя обрабатываемого материала. Поэтому в статье рассматриваются именно такие камеры.

Толщина слоя материала в этих камерах ограничена допустимой шириной  $r$  осевой щели в стенке  $a$  волновода (см. рис. 1), через которую материал вводится в волновод и выводится из него, или,

точнее, отношением  $r/a$ . Лабораторией микроволновой энергетики г. Новосибирска экспериментально установлено, что при сечении волновода  $220 \times 104$  мм, ширине осевой щели  $r = 50$  мм и её длине (по оси стенки  $a$ )  $l = 600$  мм развязка между мощностью волны в волноводе и на выходе щели составляет 30 дБ, т.е. уровень потерь в волноводе при введении в него осевой щели  $r/a = 0,23$  практически не превышает потерь 0,1% в его стенках [2]. Путём расчёта было показано, что при  $r/a \leq 0,3$  эти данные не должны существенно измениться.

Это позволяет считать, что при частоте излучения  $F_1 = 915$  МГц и стандартном сечении волновода  $248 \times 124$  мм может быть обеспечена ширина щели ввода материала в волноводную камеру  $r = 5$  мм. При необходимости проведения СВЧ-обработки более толстого слоя материала может оказаться целесообразным переход на более низкую (из числа разрешённых) частоту  $F_2 = 433$  МГц, что, по крайней мере, обеспечит возможность увеличения ширины щели в  $K = F_1/F_2 = 2,1$  раза, т.е. до  $r = 160$  мм. При проведении анализа максимально допустимой ширины щели в лаборатории микроволновой энергетики были получены данные о допустимости требуемой относительной ширины  $r/a \leq 0,3$ . Вполне вероятно, что допустимо и дальнейшее расширение.

Что же касается длины щели  $l$ , то, поскольку с её увеличением развязка возрастает линейно, полученное экспериментально значение в 30 дБ можно считать не зависящим от  $l$ .

Следует отметить, что возможное расположение щели в стенке  $a$  волновода удачно сочетается с расположением максимума поля в волноводе. Это обеспечивает высокую эффективность применения волноводной камеры с поперечным проходом материала.

Приведённый выше анализ позволяет сделать следующий вывод: потери энергии в волноводной проходной камере при поперечном прохождении

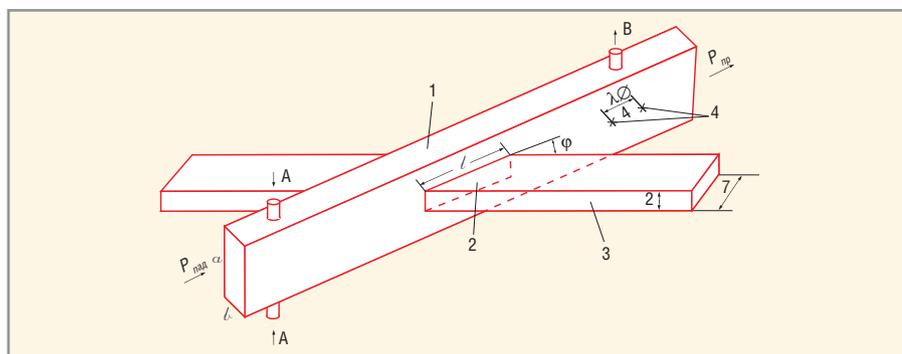


Рис. 1. Движение потока материала через волноводную камеру прямоугольного сечения

1 – камера; 2 – проходная щель; 3 – обрабатываемый материал; 4 – детекторные головки; А – вход воздуха; В – вытяжка паров (газов);  $l$  – длина пути взаимодействия волны с материалом;  $r$  – толщина потока материала;  $L$  – ширина потока материала;  $\varphi$  – угол между осью камеры и потоком материала

через неё обрабатываемого материала практически не превышают энергию, рассеиваемую в стенках волновода при прохождении через него волны основного типа  $H_{10}$ , а в сумме эти потери составляют  $q_1 < 0,5\%$ .

Вторым вопросом, связанным с вводом (выводом) обрабатываемого материала в камеру (из камеры), является обеспечение допустимого уровня паразитных электромагнитных излучений.

Экспериментально установлено, что для достижения допустимого уровня излучения ( $10...20$  мкВт/см<sup>2</sup>) достаточно установить на входе и выходе материала из камеры примыкающие к стенкам  $a$  волновода камеры металлические коробки, горизонтальные и вертикальные размеры которых соответствуют размерам щели. В каждом коробе в верхней или нижней горизонтальных плоскостях [3] должен быть установлен поглощающий материал. Хорошо зарекомендовало себя карбонильное железо толщиной насыпного слоя 20 мм. Длина поглотителя при этом составляет 0,5 м, что и определило длину защитного короба.

Важным вопросом построения СВЧ-камеры является согласование СВЧ-тракта при вводе в камеру обрабатываемого материала. Во-первых, рассогласование тракта – это увеличение его КСВН, т.е. увеличение отражённой мощности  $P_{отр}$ , а следовательно, и прямых потерь энергии. С другой стороны, увеличение КСВН нарушает нормальную работу магнетрона (например, магнетрон-генератор ГМ-50 при возрастании КСВН от 1,5 до 3 уменьшает максимальную мощность излучения с 50 до 30 кВт, а при КСВН  $> 3$  он вообще неработоспособен). Согласование СВЧ-тракта в этом случае может быть достигнуто, но ценою установки на выходе СВЧ-генератора дополнительного дорогостоящего устройства – ферритового вентиля. При этом потери энергии за счёт возрастания  $P_{отр}$  всё равно сохраняются.

Вводимый в камеру под прямым углом к волноводу материал, будучи размещённым в максимуме поля, обладая достаточно большой толщиной ( $r/a \leq 0,3$ ) и заполняя всю длину между стенками  $a$  волновода камеры, при высоких диэлектрических характеристиках (либо благодаря высокой начальной влажности, либо за счёт высоких  $\epsilon$ ,  $\text{tg}\delta$  структурной основы) создаёт большой коэффициент отражения для распространяющейся в волны. Скорее всего, по этой причине предложенная [4] схема СВЧ-установки, построенная

на волноводных камерах, соединённых между собой по схеме «Меандр» (т.е. предусматривающая ввод материала в камеру под прямым углом), не нашла широкого применения.

Очевидно, решение этого вопроса возможно путём изменения расположения обрабатываемого материала в камере, когда передняя (по отношению к распространяющейся в волноводе волне) кромка материала не перпендикулярна направлению распространения волны. Экспериментально [5] было установлено, что поворот влажной сосновой доски толщиной 20 мм в камере на 60 градусов снижает КСВН тракта с 4 до 1,5...2, т.е.  $P_{отр}/P_{пад}$  снижается с 0,36 до 0,04...0,11 (в 3 – 9 раз). В последующем уменьшение КСВН до значения 1,5...2 было подтверждено при увеличении толщины доски в два раза, то есть до 40 мм (при том же значении  $a = 220$  мм), и тех же породе и влажности доски, а также на досках из различных пород древесины (кедр, ясень, бук) при изменении их влажности от 8 до 100%. Такая стабильность значений КСВН при расположении материала под углом 30 градусов к оси волновода свидетельствует о том, что коэффициент отражения  $\rho = P_{отр}/P_{пад}$  в этом случае зависит, в основном, не от диэлектрических характеристик материала, помещённого в камеру, а от его положения в камере.

Это явление может быть объяснено тем, что волна в волноводе (как падающая, так и отражённая) распространяется только вдоль оси волновода и что все составляющие волны одинаково отражаются от материала. Но при этом как падающая, так и отражённая волны проходят в каждом сечении волновода разный путь. Это приводит к тому, что отражённые волны в любом перпендикулярном сечении волновода, складываясь, уменьшают, благодаря интерференции, суммарную амплитуду волны, снижая тем самым  $P_{отр}$ . Такой метод согласования часто используется в волноводах, например, для согласования помещённой в волновод пластины фазовращателя. Но в этом случае, поскольку пластина изготавливается из монолитного диэлектрика (например, фторопласта), коэффициент отражения по всей её границе одинаков, что определяет возможность обеспечения стабильного КСВН тракта при низких его значениях (КСВН  $\approx 1,1$ ).

В рассматриваемом случае возможны как структурные изменения материала по его длине (например, сучки в

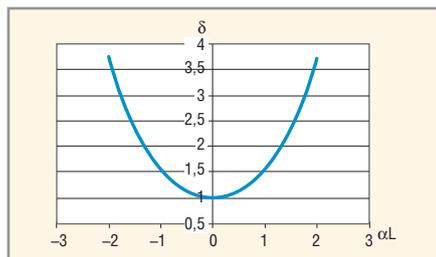
древесине), так и некоторое изменение его минералогического состава (например, при сушке руды). Поэтому трудно рассчитывать как на уменьшение разброса КСВН относительно достигнутого (1,5...2), так и на уменьшение его абсолютного значения.

Необходимо отметить, что используемый здесь метод согласования вводимого в камеру диэлектрика накладывает свои ограничения как на скорость его перемещения через камеру, так и на воздействующую на него мощность СВЧ-колебаний. Сущность этих ограничений состоит в том, что за время прохода каждого сечения материала через камеру состояние материала и определяемые им диэлектрические характеристики не должны существенно изменяться. Таким образом, скорость движения материала через камеру должна быть существенно выше скорости проводимого в камере процесса.

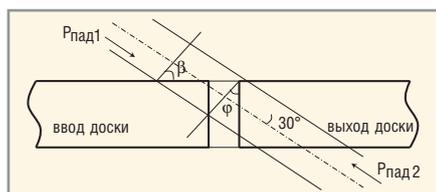
Наглядным примером этого является процесс вспучивания вермикулита. По имеющимся экспериментальным данным, при воздействующей мощности  $P_{пад} = 40$  кВт длительность процесса вспучивания составляет 5 с. Но если при такой мощности время прохода вермикулита через камеру составит 5 с, то на входе в камеру всегда находится сырой вермикулит, а на выходе – обожжённый, вспученный вермикулит, т.е. диэлектрик на порядок меньшей плотности, меньшей влажности, а следовательно, обладающий существенно меньшими диэлектрическими характеристиками. Поэтому ни о каком согласовании тракта, вне зависимости от угла наклона движения вермикулита, говорить здесь нельзя.

Вторым вопросом снижения потерь за счёт отражённой мощности  $P_{отр}$  является отражение от выходящих из материала паров воды (при сушке) или газов (например, серы при обжиге пирита). Это требует вытяжки из камеры этих газов. При этом необходимо организовать поток паров (газов) таким образом, чтобы их объём перед материалом по отношению к распространяющейся в волноводе электромагнитной волне был минимальным. Поэтому необходимо вытягивать воздух из волновода за расположенным в нём материалом (см. рис. 1).

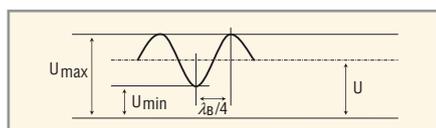
При внедрении наклонного прохождения обрабатываемого материала через камеру возрастает длина  $l$  прохождения волны через материал (соответственно, увеличивается длина щели в волноводе и общая длина камеры). С ростом  $l$  возрастает целесообразность



**Рис. 2. Зависимость коэффициента неравномерности  $\delta$  от ширины потока  $L$  при известном значении коэффициента диэлектрических потерь  $\alpha$**



**Рис. 3. Углы отклонения отражающей поверхности доски от фронта распространения волны**



**Рис. 4. Стоячая волна в волноводе**

$\lambda_{в}$  – длина волны

попеременного облучения материала с противоположных сторон, повышающая суммарную (по двум последовательным облучениям) равномерность распределения плотности потока энергии по всей длине  $l$  взаимодействия.

Это объясняется тем, что при облучении с любой одной стороны плотность энергии убывает вдоль прохождения волны по экспоненциальному закону. Тогда, по сумме двух облучений с противоположных сторон, закон изменения неравномерности потока энергии определяется гиперболическим косинусом [6]:

$$\delta = \text{ch}\left(\alpha \frac{L}{2}\right), \quad (1)$$

где  $\delta$  – коэффициент неравномерности.

Но ширина  $L$  потока материала через камеру при наклоне потока к оси волновода  $\varphi = 30^\circ$  составляет:

$$L = l/2. \quad (2)$$

Следовательно, коэффициент неравномерности потока энергии через материал определяется как:

$$\varphi = \text{ch}(\alpha L). \quad (3)$$

Для большей наглядности на рисунке 2 показана графическая зависимость ги-

перболического косинуса от его аргумента  $\rho = \alpha L$ . Видно, что при СВЧ-обработке материалов, имеющих малое значение коэффициента диэлектрического поглощения  $\alpha$ , требуемое значение  $\delta$  может быть достигнуто и при значительной ширине потока  $L$ . Поэтому на заключительном этапе сушки материалов, обладающих низкими диэлектрическими характеристиками, ширина потока  $L$  может существенно увеличиваться относительно начального этапа этого процесса.

Необходимо отметить ещё один фактор, существенно влияющий на устойчивость работы СВЧ-генератора, запитывающего волноводную камеру, – подача материала через камеру должна быть непрерывной. Действительно, если непрерывность подачи будет нарушаться, то в моменты разрыва обязательно будут возникать броски фазы и амплитуды отражённой волны, что недопустимо для СВЧ-генератора. Для обеспечения такой непрерывности при сушке досок, их торцевые поверхности должны быть перпендикулярны боковым сторонам доски, а все последовательно идущие доски должны быть пристыкованы друг к другу. Это правило относится и к формам, несущим сыпучий материал.

При выполнении условий непрерывности подачи остаётся вопрос начала процесса СВЧ-обработки и его окончания, т.е. ввода материала в камеру и вывода из неё. Дело в том, что в моменты выхода и входа потока материала волна взаимодействует не только с боковой поверхностью потока, наклонённой к оси волновода на 30 градусов и обеспечивающей минимальное значение  $P_{отр}$ , но и с перпендикулярной ей торцевой поверхностью (её угол с осью волновода составляет 60 градусов). Это показано на рисунке 3 в зависимости от направления ввода волны в камеру ( $P_{пад1}$  или  $P_{пад2}$ ) и направления движения потока (ввод в камеру материала (доски) или его выход). В одном случае ( $P_{пад1}$ , ввод доски) выполняется требуемое соотношение углов, т.к. волна отражается только боковой гранью потока. Но в другом случае ( $P_{пад2}$ , выход доски) отражение волны происходит от торцевой грани потока, отклонённой от оси волновода на 60 градусов, не обеспечивающей минимизацию  $P_{отр}$ . При подаче мощности с противоположного входа камеры  $P_{пад2}$  имеет место обратная картина, т.е. отсутствует согласование при вводе потока в камеру.

Из проведённого выше рассмотрения следует:

- при одностороннем запитывании всей последовательности камер, через которую проходит обрабатываемый материал, необходимо в последнем цикле сушки полностью загружать все камеры этим материалом, независимо от того, что обработка последних введённых в установку его порций не будет завершена;
- при наиболее эффективном, последовательном запитывании камер с противоположных сторон, необходимо ту же (см. п. 1) операцию производить и в начале обработки, т.е. до подачи мощности в камеры заполнить все последовательно соединённые камеры обрабатываемым материалом, пристыкованным отдельными порциями по торцам.

Следует отметить, что эффективность процесса, проводимого в последовательности СВЧ-камер, во многом зависит от степени его управляемости. Это определяется, прежде всего, значительным разбросом характеристик природных материалов, подвергающихся СВЧ-обработке. Например, доски из древесины одной породы могут иметь значительный разброс как по абсолютной влажности, так и по распределению влажности по сечению доски. Это влияет и на допустимую интенсивность сушки, и на выходное качество продукта. Возможность контроля этих характеристик в процессе сушки определяет степень управляемости процессом.

Основой возможности такого контроля является зависимость между диэлектрическими характеристиками и абсолютным значением влажности доски, включая её распределение по сечению.

Наиболее простым и достаточно информативным методом измерения диэлектрических характеристик в процессе СВЧ-обработки материала является измерение коэффициента поглощения  $\alpha$  материала, интегрально зависящего от обеих его диэлектрических характеристик ( $\epsilon, \text{tg}\delta$ ). Этот коэффициент определяется прямым измерением поглощённой материалом мощности  $P_{полг} = (P_{пад} - P_{отр}) - P_{пр}$ . Измерение  $P_{отр}$  в тракте волноводной камеры не представляет принципиальных трудностей, но делает аппаратуру существенно дороже, поскольку требует введения в тракт направленных ответвителей. Учитывая, что в рассматриваемом случае среднее значение  $P_{отр}/P_{пад} \leq 0,08$  и влияние отражённой мощности умень-

шается за счёт входа в материал отражённой мощности от последующей камеры, можно пренебречь  $P_{отр}$  и считать, что:

$$P_{погл} = P_{пад} - P_{пр} \quad (4)$$

Тогда, по результатам измерения  $P_{пад}$  и  $P_{пр}$ , коэффициент диэлектрического поглощения определяется как:

$$\alpha = -\frac{\ln\left(\frac{P_{пр}}{P_{пад}}\right)}{l} \quad (5)$$

Мощности  $P_{пад}$  и  $P_{пр}$  могут быть изменены с помощью детекторных головок. При этом необходимо учитывать, что в тракте распространения электромагнитных волн, благодаря сложению падающей и отражённой волн, создаётся стоячая волна. Длина стоячей волны составляет  $\lambda_{св} = \lambda_{в}/2$ , где  $\lambda_{в}$  – длина бегущей волны в волноводе. На рисунке 4 приведён график распределения напряжённости поля  $U$  в стоячей волне по длине волновода. Распределение мощности в этой волне пропорционально  $U^2$ .

Но расположение стоячей волны в волноводе (см. рис. 4) зависит от многих факторов (взаимного расположения последовательно соединённых камер, длины, толщины и диэлектрических характеристик материала и др.). Поэтому заранее определить фазу стоячей волны в сечении расположения детекторной головки невозможно, а изменение мощности в пределах 180 градусов стоячей волны может быть весьма существенным. Приемлемой точности измерения мощности можно достичь, используя как на входе, так и на выходе камер по две детекторные головки, установленные на расстоянии  $\lambda_{в}/4$ . Если эти головки предварительно совместно откалибровать по мощности, то усреднение их показаний по (6) всегда позволяет найти значение  $P_{пад}$  и  $P_{пр}$  с приемлемой точностью:

$$P_{ср} = \left(\frac{\sqrt{P_1} + \sqrt{P_2}}{2}\right)^2, \quad (6)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  – результаты измерения мощности каждой детекторной головкой.

Подводя итог проведённого выше рассмотрения основных характеристик используемого в качестве СВЧ-камеры прямоугольного волновода, можно сделать следующие выводы:

1. При проектировании камеры, на основе теории распространения электромагнитных волн в её пространстве, в большом числе случаев можно до-

биться высоких показателей процесса СВЧ-обработки материалов, обладающих необходимыми для этого диэлектрическими свойствами [6].

2. Поскольку построение камеры зависит от диэлектрических свойств материала и их изменения в процессе его обработки, проектированию камеры и установки в целом всегда должно предшествовать экспериментальное исследование процесса, в ходе которого должны быть определены условия его оптимального проведения, а также необходимые для системы автоматического управления процессом зависимости коэффициента поглощения  $\alpha$  материала от его состояния в ходе процесса. (Кстати, для проведения тепловой обработки для решения каждой задачи создаётся своя, оптимальная установка). Учитывая высокую сложность оборудования для СВЧ-обработки и, соответственно, его стоимость и продолжительность создания, проведённые экспериментальные исследования, помимо результатов по качеству готового продукта, обязательно должны дать ответы на следующие вопросы:

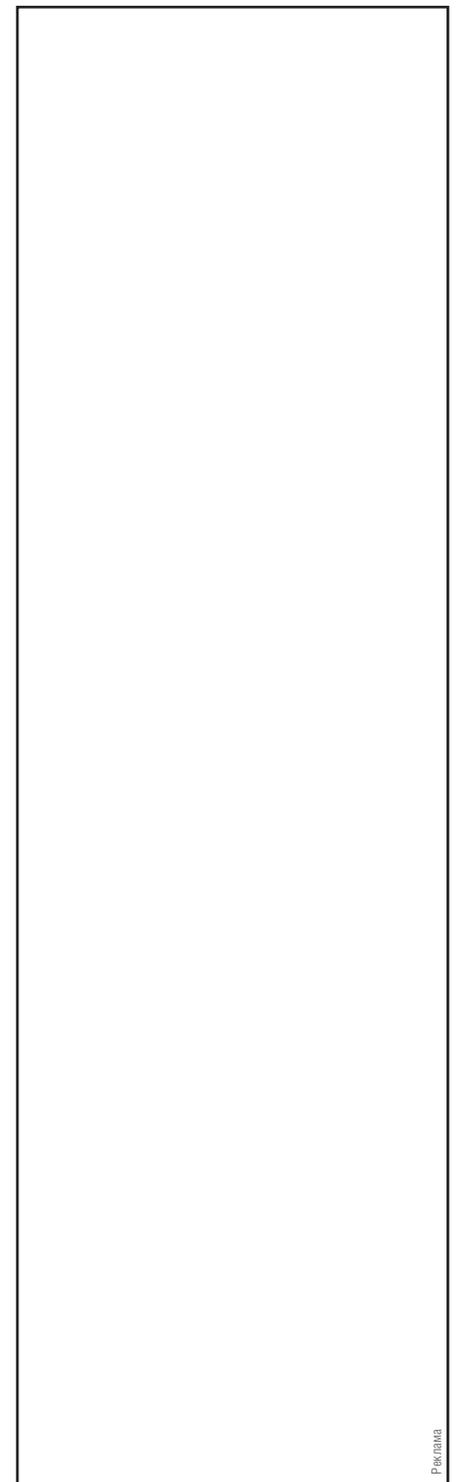
- КПД процесса и удельные энергозатраты;
- удельная производительность установки;
- ожидаемые удельные трудозатраты;
- ориентировочные сроки разработки и изготовления, стоимость оборудования.

3. Принципиально тип СВЧ-камеры может быть любым, если известно распространение электромагнитных волн в пространстве камеры с учётом расположенного в ней материала и можно теоретически или экспериментально определить долю вводимой в камеру электромагнитной энергии, которая будет поглощаться обрабатываемым материалом, и если камера обеспечивает принципиальную возможность контроля состояния процесса. На сегодняшний день этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяет рассмотренная в статье камера проходного типа, построенная на основе прямоугольного волновода.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Фельдман Н.Я.* и др. Установка для СВЧ-обжига гидрослюд. Патент на изобретение № 2171552, 2001.

2. Справочник по радиолокации. Т. 2. Советское радио, 1977.  
 3. *Фельдман Н.Я., Домбровский А.Б.* и др. Установка СВЧ-сушки древесины. Патент на изобретение № 2298745, 2007.  
 4. СВЧ-энергетика. Под ред. Э. Окресса. Т. 2. Мир, 1971.  
 5. *Фельдман Н.Я.* Некоторые вопросы сушки древесины в микроволновом поле. Деревообрабатывающая промышленность. 1996. № 6.  
 6. *Фельдман Н.Я.* Особенности проведения термических процессов в СВЧ-электромагнитном поле. Современная электроника. 2009. № 5.



Реклама