

ИССЛЕДОВАНИЯ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ: ЭЛЕКТРОДИНАМИКА РЕЗОНАНСНЫХ СИСТЕМ, ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НАУЧНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

В. Н. Родионова, В. А. Карпович, Г. Я. Слепян

В настоящее время интенсивно развивается СВЧ-техника в дециметровом и сантиметровом диапазонах длин волн и ускоренно осваиваются миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны. Это связано с расширяющимися возможностями радиолокационной, радионавигационной, связной аппаратуры, систем наведения и управления, которые могут быть реализованы только в этих диапазонах (разрешающая способность обнаружения и поражения цели, помехозащищенность, быстродействие) [1–3].

В области микроволновой техники нами проектируются приборы и компоненты с требуемыми параметрами. Разработаны такие микроволновые компоненты, как резонаторы, детекторы, смесители, генераторы, аттенуаторы, направленные ответвители и другие не только в сантиметровом и миллиметровом (1–180 ГГц), но и в субмиллиметровом диапазонах длин волн (180–405 ГГц). Основными преимуществами этих компонентов являются: широкополосность, низкие вносимые потери, низкий уровень шумов. Разрабатываются измерительные системы, позволяющие с высокой чувствительностью определять амплитудные и фазовые характеристики связных и радиолокационных систем в частотных диапазонах от 1 до 180 ГГц. Измерение амплитудных шумов производится на основе малошумящих детекторов при входной мощности 100 мкВт. Измерение фазовых шумов осуществляется на основе двухканальной схемы частотного дискриминатора при входной мощности 1 мВт. Основные технические характеристики: частотный диапазон от 1 до 118 ГГц (9 моделей); чувствительность измерения на частоте отстройки от несущей, равной 10 кГц, составляет:

- при измерении амплитудных шумов от –150 дБ/Гц до –165 дБ/Гц в зависимости от модели;
- при измерении фазовых шумов от –110 дБ/Гц до –145 дБ/Гц.

Разрабатываются системы для измерения параметров различных диэлектрических материалов. Интенсивно ведутся работы по созданию новых типов линий передачи, работающих на новых физических принципах.

Высокодобротные СВЧ-резонаторы с разреженным спектром собственных колебаний

Особое место среди СВЧ-элементов всегда занимали высокодобротные СВЧ-резонаторы, используемые для стабилизации частоты генераторов, в качестве волномеров, фильтров, при измерении спектральных и флуктуационных характеристик сигналов, физических параметров материалов.

В СВЧ-диапазоне широко применяются различные типы резонаторов: коаксиальные, цилиндрические, открытые и т. д. [4–6]. Они осуществляют накопление энергии электромагнитного поля в некотором ограниченном объеме про-

странства, частотную селекцию, стабилизацию частоты генераторов и т. д. Основные требования, обычно предъявляемые к резонаторам: высокая собственная добротность, широкий диапазон перестройки (при отсутствии мешающих и вырожденных типов колебаний), возможность согласования со стандартными волноводами в диапазоне перестройки без подрегулировки элемента связи в процессе перестройки [7].

Нами исследованы «многомодовые» цилиндрические (см. рис. 1) резонаторы.

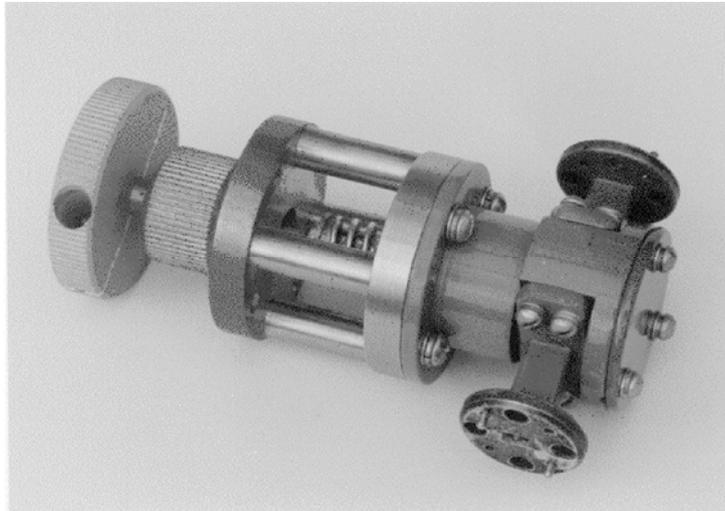


Рис. 1. Высокодобротный широкодиапазонный цилиндрический резонатор

Расчет цилиндрических резонаторов проводился по диаграмме типов колебаний:

$$(f_p D)^2 = (c x_{lm} / \pi)^2 + (c n / 2)^2 (D / L)^2,$$

где f_p – резонансная частота; c – скорость света; D и L – диаметр и длина резонатора; n – число полуволн, укладываемых вдоль оси резонатора; x_{lm} – значение корней бесселевых функций для E -колебаний или их производных для H -колебаний [8–9].

Рассмотрена строгая методика электродинамического расчета собственных E_{0np} -колебаний цилиндрического резонатора с коаксиальным выступом при учете конечной проводимости стенок [10–11]. Анализ выполнялся модифицированным методом вычетов, распространенным на задачи о собственных колебаниях. Получено аналитическое соотношение для собственной добротности:

$$q = \frac{2 [(p + 1/2) \pi + \gamma(k_0)] \ln(1/x)}{(1+x) [(p + 1/2) \pi + \varepsilon(k_0)] / k_0 b x + 2 \ln(1/x) (1 + k_0^2 b^2 \beta(k_0))},$$

где $q = k_0 \Delta_0 Q$ (Q – собственная добротность, Δ_0 – толщина скин-слоя материала резонатора); $x = a / b$; $p = 1, 2, \dots$.

Зависимость q (сплошная линия) и $x = k_0 b$ (пунктирная линия) от L/b для колебаний E_{010} приведена на рис. 2.



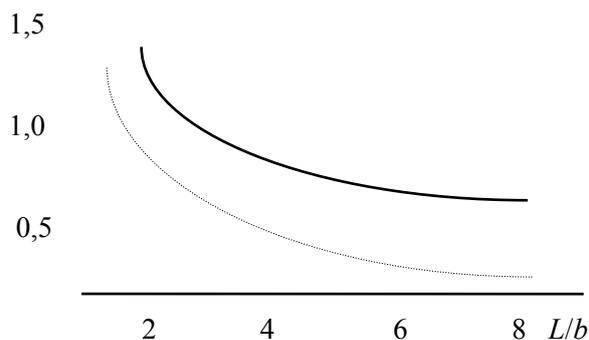


Рис. 2. Зависимость q и x от L/b для E_{010} -колебаний

В диапазоне частот 32–405 ГГц предложен новый тип резонатора – гребенчатый резонатор, основанный на эффекте аномально малого затухания H – поляризованных волн в гофрированных структурах [12–14]. Резонатор представлен на рис. 3.

Рабочими колебаниями данного резонатора являются моды типа E_{0mn} , представляющие собой суперпозицию прямого и встречного волновых пучков с аксиальной симметрией, электрически поляризованных вдоль гребней периодической структуры. Выигрыш в поглощении гребенчатой поверхности по сравнению с гладкой будет иметь место для волновых пучков, угол скольжения q которых над поверхностью достаточно мал, а λ не близко к $2D$, где D – глубина канавки. При выполнении условия $L > b$ потери в боковой поверхности являются преобладающими, а их уменьшение за счет гофрировки значительно меняет полную добротность. Получено соотношение для собственной добротности гребенчатого резонатора:

$$1/Q = 2 \operatorname{Re} Z_0 [2 + L (1 + D/d) \beta \operatorname{Cos}^2 \theta / b] / W_0 n \pi,$$

где $\beta = \operatorname{Re} Z_{01} / \operatorname{Re} Z_0$, Z_0 , Z_{01} – соответственно поверхностные импедансы торцевых и боковых поверхностей; D и d – глубина и период гребенки; $W = 120 \pi \text{ Ом}$.

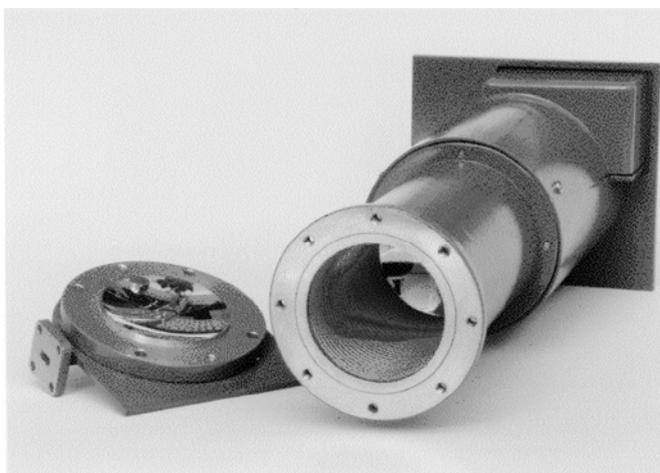


Рис. 3. Высокодобротный гребенчатый резонатор

В области создания новых физических механизмов повышения добротности и исследования принципов широкополосных элементов связи высокодобротных резонаторов со стандартными волноводами нами разработаны методики расчета широкополосных элементов связи высокодобротных резонаторов с одномодовыми волноводами. Рассчитана связь открытого резонатора со сферическими зеркалами круговой формы и прямоугольного волновода на волне H_{10} через диафрагму с малым круговым отверстием [15]. Расчет выполнялся в дипольном приближении. В тензоре магнитной поляризуемости отверстия связи учтено влияние стенок волновода.

$$Q_{\text{св}} = \frac{a b l^2 L^2}{32 \pi M^2 \sqrt{1 - (\lambda / 2 a)} \sqrt{L (1 - L / 2 r_0) / 2 r_0}},$$

где M – коэффициент магнитной поляризуемости; L – расстояние между зеркалами; r_0 – радиус кривизны зеркал.

Разработана методика расчета диафрагмы с двумя близко расположенными малыми круговыми отверстиями [16]. Тензор поляризуемости такой структуры рассчитывался с учетом взаимного влияния отверстий. Задача о магнитной поляризуемости двух круглых отверстий в плоском экране рассматривалась при помощи метода парных интегральных уравнений. Ее решение было сведено к системе интегральных уравнений Фредгольма для вспомогательных функций. Получены простые аналитические соотношения для тензоров поляризуемости с учетом их взаимного влияния.

Предложен расчет связи волновода с резонатором через плавные волноводные переходы [17–18] на основе олинеровской модели, до этого применявшейся для расчета неоднородностей микрополосковых линий. В рамках этой модели реальный элемент связи заменен его прототипом, в котором вместо узких «электрических» стенок используются «магнитные» стенки. Размер широкой стенки прототипа

$$b_{\text{эф}} = b \nu, \text{ где } \nu = [1 - (\lambda / b)^2]^{1/2}.$$

Рабочие колебания ТЕМ в резонаторе не меняют структуру поля, оттого что «магнитные» стенки продолжены в резонатор. Эта модель позволила вычислить мощность в волноводе и определить коэффициент передачи из решения ключевой двумерной задачи дифракции на открытом конце плавнонерегулярного волновода с фланцем:

$$Q_{\text{св}} = \frac{L^2}{a \nu a_0 b k T_0 k^2} \left(\frac{L}{R} \left(1 - \frac{L}{aR} \right) \right)^{-1/2},$$

где L – расстояние между зеркалами; R – радиус кривизны зеркал; a – коэффициент, зависящий от типа резонатора; $\nu = [1 - (\lambda / 2b)^2]^{1/2}$; T_0 – коэффициент передачи, определяемый из решения двумерной задачи [19].

Технологические трудности изготовления бездиафрагменных элементов связи резко возрастают с укорочением длины волны. Поэтому представляет интерес использование в качестве элемента связи полупрозрачной решетки, нане-

сенной на диэлектрическую подложку [20]. Такие элементы связи изготавливаются на основе интегральной технологии. Разработана методика расчета $Q_{св}$ этих элементов связи.

$$Q_{св} = \frac{a b \lambda^2 L^2}{32 \pi \beta M_{эфф} \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2} \sqrt{L/2 r_0} (1 - L/2 r_0)},$$

где a и b – размеры выходного волновода; r_0 – радиус кривизны зеркал;

$$M_{эфф} = \frac{\pi}{16} \frac{4a^2 c}{2d} \sum_{p=1}^N 2 d \sin \pi (xp + 2pd) / d,$$

где N – число щелей в решетке.

На основе выполненных теоретических исследований разработан универсальный комплект широкодиапазонных измерительных резонаторов в диапазоне частот 0,6–405 ГГц [21]. Основные технические характеристики этого комплекта приведены в табл. 1.

Исследованные принципы согласования многомодовых резонаторов и стандартных волноводов использованы при разработке СВЧ-устройств, работающих на основе микроволновой технологии нагрева.

Таблица 1

Комплект широкодиапазонных измерительных резонаторов

Модель	Частотный диапазон (ГГц)	Тип резонатора	Тип выхода	Добротность (min)	кскв (max)	Вес, кг
PBO101	32,00–53,57	открытый	волноводный	60000	1,65	5,5
PBO111	53,57–78,33			66000	1,70	6,0
PBO121	78,33–118,1	цилиндрический		75000	1,70	4,1
PBO131	118,1–178,4			75000	1,90	3,7
PBC501	17,44–21,60			42000	1,80	2,1
PBC511	21,60–25,95	гребенчатый		48000	1,90	2,0
PBC521	25,95–32,00			45000	2,00	1,7
PBC531	32,00–37,50			45000	2,00	1,6
PBG531	32,00–37,50	цилиндрический		60000	1,65	4,5
PBG541	37,50–47,00			60000	1,65	3,5
PBG551	47,00–53,57	коаксиальный		60000	1,60	3,3
PBC311	2,00–3,00			18000	1,60	8,7
PBC321	3,00–4,00			24000	1,60	13,7
PBC331	4,00–5,20			51000	1,60	11,2
PBC371	4,90–5,64			57000	1,60	9,5
PBC401	5,64–7,20			42000	1,60	6,5
PBC411	6,93–8,15			42000	1,60	5,4
PBC421	7,60–9,80			45000	1,50	5,5
PBC451	9,40–12,05			45000	1,80	4,5
PBC061	8,15–12,05			42000	1,60	6,6
PBC461	12,05–15,40			42000	1,95	3,7
PBC481	15,40–17,44			42000	1,95	3,5
PBC071	12,05–17,44	42000	1,80	5,1		
PBC241	0,60–1,20	неоднородный		10000	1,20	4,5
PBC251	1,07–2,14			10000	1,60	3,8

Стерилизация почвы в тепличных хозяйствах

Овощеводство защищенного грунта в значительной мере получило развитие за счет строительства крупноблочных теплиц и создания специализированных тепличных хозяйств. Одновременно происходит перевод выращивания тепличных культур на промышленную основу с применением новых технологий, видов растений, сортов и гибридов. В этих условиях необходим поиск новых решений при проведении мероприятий по защите растений от вредителей и болезней.

Большой ассортимент овощных культур, работа крупных тепличных комбинатов в течение круглого года практически исключают возможность уничтожения в период зимних холодов устойчивых к пестицидам популяций вредителей, болезней и одновременно снижают эффективность профилактических мероприятий, проводимых в теплицах по окончании вегетации растений. Основной причиной потерь урожая овощных культур (до 50–70 %) являются болезни и вредители, иногда они приводят к полной гибели растений. Специалисты вынуждены увеличивать как кратность обработок растений акарицидами, инсектицидами и фунгицидами, так и нормы расхода препаратов. Все это приводит к накоплению остатков пестицидов и их токсичных метаболитов в почве, растениях, плодах, резкому ухудшению условий труда рабочих в теплицах.

Наиболее вредоносными и распространенными вредителями и болезнями овощных культур являются паутинный клещ, тепличная белокрылка, тли, трипсы, галловая нематода, серая, белая и корневая гнили, бактериозы. Для этих вредителей и патогенных микроорганизмов местом обитания и сохранения является почва. Поражение томатов бактериозами особенно усилилось за последние 5–6 лет. Это связано с тем, что для выращивания овощной продукции приобретаются семена голландской селекции, которые являются одним из основных источников бактериальной инфекции. Вредоносность бактериозов проявляется в снижении как количества, так и качества урожая. Бактериальный рак томатов часто поражает от 10 до 96 % растений. Не менее вредны и корневые гнили, вызывающие гибель 32–50 % растений, в некоторых случаях количество отмерших растений достигает 90 %. Причиной значительных потерь урожая являются также и вредители – белокрылка, тли, трипсы. Сложность борьбы с ними заключается в видовом многообразии вредителей, исключительно высоких темпах размножения, высокой плодовитости. Многие из вредителей, закончив питание, переселяются в почву, где превращаются в прониципу и нимфу. Зимуют вредители в верхнем слое почвы. В последние годы во многих тепличных хозяйствах республики распространены и галловые нематоды, снижающие урожай огурцов и томатов до 40 %. Наиболее благоприятным условием для их развития является влажность почвы 40–60 %. Сухость почвы, как при высоких, так и при низких температурах, способствует гибели нематод.

До настоящего времени основными приемами уничтожения возбудителей болезней растений были химический метод и термическая обработка почвы. Приобретение химических препаратов для обработки почвы требует значительных валютных средств. Непременным условием получения высокой эффективности нематодцидов является правильное их применение и внесение в почву спе-

циальными машинами. Нынешнее состояние этого вопроса крайне неудовлетворительно. В имеющейся системе машин по защите растений нет ни одной для внесения фумигантов в почву. Термическая обработка трудоемка, дорога и требует больших расходов энергоресурсов – на 1 га обрабатываемой площади расходуется 110 тыс. м³ газа. При этом также остается необходимость применения нематодицидов.

Современная экономическая и экологическая ситуация в республике требует поиска и внедрения новых эффективных методов борьбы с почвенной и семенной инфекциями. Для решения этой проблемы в НИИ ЯП была разработана установка для стерилизации почвы в тепличных хозяйствах [22]. Использование этой установки позволило реализовать экологически чистую микроволновую технологию для борьбы с болезнями растений и стерилизации почвы. Эта технология основывается на стерилизующем эффекте СВЧ электромагнитных колебаний, который заключается в избирательном нагреве патогенных микроорганизмов, являющихся влажными диэлектриками. Возбудители болезней при СВЧ-воздействии погибают вследствие высокой скорости нарастания их температуры. За 1 с температура микроорганизмов повышается на 5–7 °С, при этом нагрев идет внутри организма. Регулируя время воздействия или интенсивность электромагнитного излучения, можно добиться полной стерилизации минеральных субстратов, используемых в настоящее время в современных технологиях выращивания овощной продукции.

Разработанная нами СВЧ-установка представляет собой объемный резонатор, способный накапливать электромагнитную энергию. Резонанс позволяет изменить соотношение между величинами напряженности электрического поля и подводимой мощностью в резонаторе и значительно интенсифицировать воздействие СВЧ-энергии на помещаемый в резонатор минеральный субстрат, который является диэлектрическим материалом с малыми потерями. Структурная схема установки представлена на рис. 4.

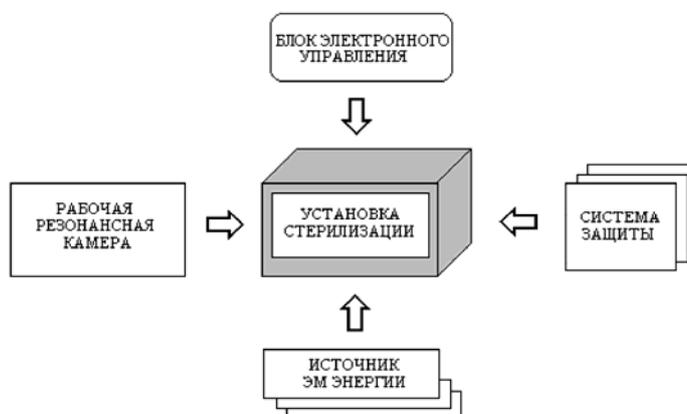


Рис. 4. Структурная схема установки для стерилизации грунтов

Резонанс достигается благодаря определенным фазовым соотношениям между подводимой волной и волнами, отраженными от волноводных элементов, ограничивающих полость собственно резонатора.

Основные характеристики объемного резонатора можно представить, воспользовавшись его эквивалентной RCL схемой (рис. 5).

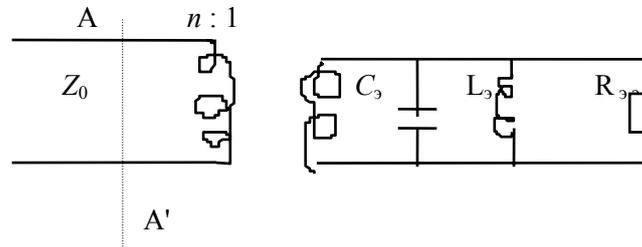


Рис. 5. Эквивалентная схема резонатора

При резонансе сопротивление в сечении AA' (случай недосвязи – в сечении AA' минимум стоячей волны) равно R_0 , для которого в работе [7] получено соотношение

$$\frac{R_0}{Z_0} = \left[\frac{1 - \sqrt{1 - k_c^2}}{1 + \sqrt{1 - k_c^2}} \right] \left[\frac{1 - e^{-a_t}}{1 - e^{a_t}} \right],$$

где Z_0 – характеристическое сопротивление; a_t – коэффициент затухания волны в резонаторе; k_c – коэффициент связи.

Связь резонатора с волноводом представлена на эквивалентной схеме в виде идеального трансформатора с соотношением витков $n : 1$, где

$$n^2 = \frac{1 - \sqrt{1 - k_c^2}}{1 + \sqrt{1 - k_c^2}}, \quad k_c = \sqrt{1 - e^{-2 a_t}}.$$

Величины R_3 , L_3 , C_3 можно рассматривать как внутренние параметры самого резонатора, тогда как n^2 характеризует степень связи (форму, размер и положение отверстия).

Для резонатора, используемого в данной стерилизующей установке, выполнялось условие $2pD/l$, где D – наибольший размер резонатора. Так как в установке в качестве источника электромагнитных колебаний использовались магнетроны с рабочей частотой 2,45 ГГц, то и расчет геометрических размеров объемного резонатора проводился на данной частоте. Расчетные размеры камеры были следующие: $2200 \times 1600 \times 1400$ мм. В таком резонаторе, размеры которого значительно превосходят длину волны, существуют 64 типа колебаний. Это связано как с возможностью распространения различных типов волн, так и с возможностью различного их направления по отношению к стенкам резонатора. Для обеспечения большей равномерности распределения электромагнитного поля в многомодовом резонаторе использовали ряд мер, которые привели к тому, что коэффициент равномерности электромагнитного поля в камере равнялся 0,98. Прежде всего, наличие такого количества близких по частоте собственных

мод приводит к перекрытию резонансных кривых отдельных мод и, следовательно, к более гладкой кривой зависимости эквивалентного импеданса камеры от частоты. Это облегчает согласование генератора (магнетрона) с резонансной камерой. Чтобы возбудить в резонаторе необходимые виды колебаний с помощью прямоугольного волновода, ввод электромагнитной энергии размещали в области пучности магнитного поля соответствующей моды. Для увеличения числа возбуждаемых мод увеличили число вводов. В данной камере использовались три ввода и соответственно три магнетронных генератора типа М-135. В результате суммарная СВЧ-мощность в камере составляла 2,5 кВт. Для повышения равномерности распределения суммарного электромагнитного поля по объему камеры по внутренним боковым стенкам камеры расположены периодические структуры, которые осуществляют отжатие поля от стенок камеры. Физический механизм такого отжатия аналогичен отжатию поля от цилиндрических стенок в высокодобротных гребенчатых резонаторах.

Размеры камеры позволяют размещать в ней одновременно до 250 пакетов с грунтом. При такой загрузке режим работы камеры дает возможность в течение 12 ч нагреть содержимое каждого пакета до 90 °С .

Экспериментальные исследования проводились в тепличном хозяйстве колхоза им. Орджоникидзе Смолевичского района Минской области с участием Института защиты растений Академии аграрных наук Республики Беларусь. Для экспериментальных исследований использовали рассадные кубики и маты после выращивания огурца. опыты были заложены в 4-кратной повторности. Перед обработкой в микроволновой установке в кубиках и матах был проведен анализ корневой системы огурца на пораженность возбудителями болезней. В кубиках и матах из минеральной ваты были обнаружены споры аскохитоза, серой и корневой гнилей. После микроволновой стерилизации наблюдалась 100 % гибель спор обнаруженных возбудителей болезней.

Опытный образец установки изготовлен на заводе № 407 гражданской авиации, там же прошел все испытания по электрическим и конструктивным параметрам. Испытания проводились по методикам, приведенным в ОСТ 11 0367-86. Результаты испытаний показали, что опытный образец установки микроволновой стерилизации почвы может использоваться для борьбы с болезнями растений и стерилизации почвы в тепличном хозяйстве.

Результаты испытаний подтвердили высокую эффективность предлагаемого метода стерилизации, о чем свидетельствуют акты экспериментальных исследований. Этот метод был рекомендован для использования в производственных условиях.

Таким образом, разработана энергосберегающая высокоэффективная экологически чистая микроволновая технология стерилизации для малообъемной технологии выращивания овощной продукции, широко внедряемой в настоящее время в тепличных хозяйствах республики.

Микроволновая сушка древесины

Деревообрабатывающей промышленности Республики Беларусь требуется большое количество сухой и качественной древесины. Сушка древесины до влажности 6–15 % происходит в традиционных сушильных камерах при помощи внешнего агрессивного воздействия – температуры, пара, вакуума. При таком воздействии в первую очередь высыхают поверхностные слои древесины и, обезвоживая их, процесс сушки продвигается вглубь материала. В зоне соприкосновения слоев сухой и еще влажной древесины возникают противодействующие напряжения. В высушенной части древесины действует напряжение сжатия, а во влажной – напряжение растяжения. Кроме того, в сухом верхнем слое древесины сужаются капилляры, препятствуя тем самым свободному выходу влаги на поверхность. В результате в зоне напряжений происходит растрескивание или деформация материала. Для того чтобы избежать этого, в традиционных сушильных камерах используют мягкие режимы сушки и искусственное увлажнение, что увеличивает сроки и удорожает процесс сушки, особенно для древесины твердых пород.

Повысить производительность процесса сушки и качество материала возможно лишь в том случае, если древесина одновременно и равномерно прогревается по всему объему. Это достигается только в сушильных камерах, работающих по принципу диэлектрического нагрева. Здесь отсутствует теплоноситель, на нагрев которого необходимы энергозатраты, а СВЧ-излучение, проникающее во всю глубину древесины, вытесняет влагу по открытым капиллярам на поверхность, откуда она удаляется воздушными тепловентиляторами.

Основные преимущества применения СВЧ-энергии следующие.

- Будучи влажным материалом, древесина обладает очень высокой поглощаемостью СВЧ-излучения, которое обусловлено высоким значением коэффициента диэлектрических потерь воды, равного 81, в то время как у древесины он равен 16.
- Возможность подвести и выделить в единице объема древесины такую мощность, которая недоступна ни одному из традиционных способов подвода энергии. Энергия, выделяемая в древесине, пропорциональна частоте магнетрона, поэтому в 3-сантиметровом диапазоне длин волн будет выделяться (при одинаковой электрической напряженности) в 1000 раз больше энергии, чем в 10-метровом диапазоне.
- Возможность осуществить бесконтактный избирательный нагрев и получить требуемое распределение температур в древесине, саморегулирующийся нагрев, тепловая безынерционность (т. е. возможность мгновенного включения и выключения теплового воздействия на древесину). А отсюда и высокая точность регулирования нагрева.
- Практически 100 % КПД преобразования СВЧ-энергии в тепловую, выделяемую в нагреваемом материале, низкие потери энергии в подводящих трактах и рабочих камерах.

Основные задачи при расчете и конструировании рабочих камер для микроволновых сушилок состоят в согласовании рабочей полосы камеры и магне-

тронов и обеспечении необходимой равномерности нагрева обрабатываемой древесины.

Следует отметить, что при большой нагрузке добротность рабочей камеры падает и согласование ввода энергии с резонаторной камерой перестает быть проблемой, а равномерность нагрева определяется способом облучения нагреваемого материала. В случае слабой загрузки рабочей камеры ее можно рассматривать как резонатор без потерь. Существенное увеличение равномерности нагрева обрабатываемого материала возможно при использовании для возбуждения рабочей камеры нескольких магнетронов. Кроме того, так как линейные размеры резонатора, примененного в качестве рабочей камеры в микроволновой сушилке, во много раз превышают длину волны магнетронов, то в резонаторе, которым является внутренняя камера сушилки, можно возбудить несколько собственных видов колебаний, имеющих различное расположение узлов и пучностей электрического поля, что приводит к существенному увеличению равномерности нагрева обрабатываемого диэлектрика. Расположение в пределах рабочей полосы магнетрона многих близких по частоте собственных видов колебаний приводит также к перекрытию резонансных кривых отдельных резонансов и, следовательно, к более гладкой зависимости импеданса от частоты, что облегчает согласование магнетрона со слабозагруженным резонатором.

Кроме того, предложено увеличить равномерность нагрева использованием для возбуждения нескольких магнетронов.

Расчет многомодовых прямоугольных резонаторных камер для устройств СВЧ-сушки. Длины волн собственных колебаний прямоугольного резонатора определяются равенством

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{(m/2a)^2 + (n/2b)^2 + (l/2c)^2}},$$

где m, n, l – произвольные целые числа; a, b, c – линейные размеры резонатора.

Рассчитаны 4 модели резонансных камер для сушки диэлектрика. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Размеры резонансных камер для сушки диэлектрика

№ модели	a	b	c	g	h	g ₁	h ₁
1	1700	850	850	337	337	337	337
2	2550	850	850	398	275	398	275
3	2550	1700	1700	1244	456	456	394
4	3400	1700	1700	1244	456	470	425

Чтобы возбудить в резонаторе необходимые виды колебаний с помощью прямоугольного волновода, необходимо знать распределение тангенциальных компонент магнитного поля видов колебаний у той стенки резонатора, к которой присоединяется ввод энергии. Помещая ввод энергии в пучность магнитного поля, можно возбудить определенный вид колебаний. Мы применяли несколько вводов (в зависимости от модели). По два – для моделей № 1 и 2, и по четыре –

для моделей № 3 и 4. Для предотвращения перекачивания энергии из одного ввода в другой обеспечивали развязку между ними. Такую развязку получили, располагая каждый ввод энергии вблизи узла магнитного поля вида колебаний, возбуждаемого другим вводом.

Для правильного выбора месторасположения вводов электромагнитной энергии в резонансную камеру рассматривалось распределение максимумов магнитного поля отдельных видов колебаний. Распределение тангенциальной составляющей магнитного поля на стенке $x = 0$ имеет следующий вид:

для колебаний типа E

$$\begin{aligned} H_x &= 0, \\ H_y &= \sin(n\pi y/b) \cos(l\pi z/c), \\ H_z &= 0; \end{aligned}$$

для колебаний типа H

$$\begin{aligned} H_x &= 0, \\ H_y &= [p m \pi^2 \sin(n\pi y/b) \cos(l\pi z/c) / b c] / (k^2 - mn/c)^2, \\ H_z &= \cos(l\pi y/b) \sin(m\pi z/c), \end{aligned}$$

где $k = 2\pi/\lambda$.

Из вышеприведенных формул видно, что ввод энергии, в котором существует только компонента магнитного поля (прямоугольный волновод на волне H_{10}), может возбудить в резонаторе колебания как типа E , так и типа H . При этом компоненты магнитного поля, направленные вдоль оси Z резонатора, возбуждают только колебания типа H . Поэтому соотношение амплитуд и количество возбуждаемых типов колебаний E и H подбирались возбуждением двумя волноводами с взаимно ортогональной поляризацией поля. Основные технические характеристики СВЧ-сушилок помещены в табл. 3.

Таблица 3

Основные технические характеристики СВЧ-сушилок

Область применения	Сушка пиломатериалов
Принцип действия	Комбинированный диэлектрический и конвективный нагрев
Объем рабочей камеры	От 1 м ³ до 10 м ³
Производительность	Снижение влажности в сутки в зависимости от режима сушки, сорта и размера пиломатериалов от 1,5 до 6 %
Конечная влажность	Не более 10 %
Потребляемая мощность	Не более 8 кВт
Максимальная толщина пиломатериалов	Не более 60 мм
Масса	Не более 1300 кг

Процесс СВЧ-нагрева в разработанных сушилках характеризуется высокой производительностью, тепловой безынерционностью, высоким качеством высушиваемого материала, экономичностью, а также возможностью сушки как исходного пиломатериала, так и непосредственно полуфабриката (заготовок).

Экспериментальное исследование электродинамических характеристик биологических объектов на примере семян овощных культур

Для экспериментального подтверждения проведенных теоретических исследований Институт ядерных проблем и лаборатория защиты овощных культур БелНИИ защиты растений провели исследования по обеззараживанию семян овощных культур путем их обработки СВЧ.

Для постановки эксперимента был создан макет установки для микроволновой обработки семян различных сельскохозяйственных культур в широком частотном диапазоне (от 37 до 120 ГГц) с плавной регулировкой мощности от 1 до 10 мВт.

Исследовалось влияние микроволнового низкоинтенсивного излучения на посевные качества, на рост и развитие растений в онтогенезе культуры. С этой целью семена были обработаны на макете экспериментальной установки в режимах 1–4, а затем в чашках Петри в лабораторных условиях проращивались. Определяли лабораторную всхожесть и снижение пораженности фитопатогенами.

На семенах лука-чернушки («Голландский желтый») при всех режимах обработки повышалась лабораторная всхожесть (75,7; 74,3; 70,5; 67,5 %) относительно контроля (51,0 %) и эталона ТМТД (51,0 %), снижалась пораженность альтернариозом, стеффилиозом, мукором с 2,0 % в контроле до 0,5 % в варианте с режимом 4.

На семенах капусты («Подарок») результативной оказалась обработка семян в режимах 1 и 4, повышающая всхожесть до 98,0; 98,7 % по сравнению с контролем – 95,2 % и эталоном ТМТД – 95,7 % и снижающая пораженность альтернариозом с 4,8 % в контроле до 2,0–0,3 %.

Лабораторная всхожесть семян томатов («Слава Молдовы») повышалась во всех вариантах (90,5–95,7 %) относительно контроля (89,7 %) и эталона (70,3 %). Пораженность комплексом болезней в режимах 1–4 снизилась до 6,0–3,8 % по сравнению с контролем – 10,3 %.

Лабораторная всхожесть семян моркови («Нантская») повышалась в режимах 2 и 4 (73,2; 72,5 %) относительно контроля (69,2 %) и эталона (68,0 %), пораженность альтернариозом снижалась с 4,3 % в режиме 2 до 3,5 % в режимах 3 и 4 и до 1,8 % в режиме 1 относительно контроля – 12,5 %.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что воздействие СВЧ улучшает посевные качества семян капусты, моркови, лука-чернушки, томата и снижает пораженность фитопатогенным комплексом (альтернариозом, макроспориозом, бактериозом, стеффилиозом, мукором) [23].

Были проведены и экспериментальные работы по исследованию резонансного воздействия электромагнитных волн низкой интенсивности на семена томатов и огурцов в теплицах Института защиты растений. Данные опытов показали, что лабораторная всхожесть семян огурца (сорт «Изящный») относительно контроля была выше на 3,5 %. При этом при проведении фитопатологической экспертизы на обработанных семенах возбудителей грибных болезней не выявлено.

Контроль за дальнейшим ростом и развитием растений в онтогенезе культуры, фитосанитарной ситуацией осуществлялся в изолированном боксе. Пророщенные семена высевались в почву, помещенную в горшки. В каждом варианте (было рассмотрено 4 варианта обработки, которые соответствовали 4 стандартным частотным диапазонам миллиметровых волн, и один контрольный) было по 20 горшков и 40 растений.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что микроволновая обработка семян достоверно увеличивает площадь листа растений от 37 до 62 %, а длину стебля – от 35 до 58 % относительно контроля. При этом наблюдалась 100 % всхожесть семян.

Кроме того, в целях разработки новой эффективной экологически безопасной и низкоэнергетической биотехнологии предпосевной обработки семян овощных культур в Республике Беларусь проводились экспериментальные исследования с Белорусским НИИ овощеводства по воздействию низкоинтенсивного микроволнового электромагнитного излучения на семена овощных культур. Семена обрабатывались в различных режимах, а затем высевались в тепличных боксах НИИ овощеводства. Результаты опытов следующие:

1) на семенах капусты «Белорусская» полевая всхожесть в режимах 1 и 3 повышалась до 82 % по сравнению с контролем – 62 %;

2) на семенах капусты «Русиновская» полевая всхожесть в режиме 1 – 97,5 %, в контроле – 62 %;

3) на семенах свеклы полевая всхожесть в режиме 3 – 97 %, в контроле – 89 %;

4) на семенах моркови в режиме 1 – 55,5 %, в контроле – 48 %;

5) на семенах лука в режиме 1 – 63 %, в контроле – 54 %;

6) на семенах томатов в режиме 1 – 92 %, в контроле – 78 %;

7) на семенах огурца в режиме 1 – 97 %, в контроле – 81 %.

Полученные биометрические характеристики растений показали, что биофизическая обработка семян оказывает стимулирующее воздействие во всех режимах по сравнению с контролем, но предпочтительнее оказывается режим 1.

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют утверждать, что воздействие низкоинтенсивного микроволнового излучения улучшает посевные качества семян капусты, свеклы, моркови, лука, томатов и огурцов, снижает пораженность семян фитопатогенным комплексом. Из этого следует вывод, что метод резонансного воздействия электромагнитных волн низкой интенсивности СВЧ-диапазона на семена овощных культур является перспективным экологически безопасным технологическим приемом предпосевной обработки семян овощных культур.

Экспериментально подтверждено, что зависимость эффекта от частоты СВЧ-излучения, действующего на семена, носит резонансный характер. Наблюдаемые эффекты не зависели от времени воздействия и от плотности потока энергии.

Основываясь на вышеизложенных результатах теоретических и экспериментальных исследований воздействия электромагнитных полей на биологические объекты, можно сделать первоначальные выводы о механизмах этого воздействия.

Проанализированы различные методы нелинейной электродинамики для формулировки математической модели взаимодействия. Проведен электродинамический расчет клеточной мембраны как многомодовой нелинейной электродинамической структуры. Сформулирована математическая модель мембраны как системы связанных нелинейных осцилляторов, причем нелинейными являются не только резонансные частоты, но и параметры диссипации. Показано, что эффекты в миллиметровом диапазоне носят мультирезонансный характер: резонансные частоты $f = 60, 75, 94, 118$ ГГц.

Проведенные лабораторные исследования воздействия электромагнитных колебаний СВЧ-диапазона на семена овощных культур подтверждают направленное влияние электромагнитного излучения на характер развития семян и сводятся к управлению происходящими в семенах восстановительными процессами, нарушенными вследствие семенной инфекции, к активации процессов биосинтеза и деления клеток.

Полученные результаты открывают широкую возможность для новых исследований в области биофизики и клеточной медицины. Дальнейшее изучение механизмов взаимодействия клеток между собой и внутреннего взаимодействия мембран с ядрами поможет понять физику взаимодействия элементарных объектов живого организма, имеющего практическое значение для медицины.

Литература

1. Karnal A. K. // L'Onde Electrique. 1989. Vol. 69, № 6. P. 70–77.
2. Olver A. D. // IEEE Proc. Pt.F. 1989. Vol. 136, № 1. P. 35–52.
3. Видулов И. К. // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. 1992, вып. 5. С. 3–8.
4. Власов В. И., Берман Я. И. Проектирование высокочастотных узлов радиолокационных станций. Л., 1978.
5. Вайнштейн Л. А. Открытые резонаторы и открытые волноводы. М., 1966.
6. Вайнштейн Л. А., Маненков А. Б. // РЭ. 1975. Т. 18, № 9. С. 1777–1781.
7. Альтман Л. Устройства сверхвысоких частот. М., 1969.
8. Rodionova V. N., Slepyan A. Ya., Slepyan G. Ya. // XXIII General Assembly of Intern. Union of Radio Science: Abstracts. Hungary, 1992. Vol. 2. P. 344.
9. Копусов В. Н., Родионова В. Н. Перестраиваемый СВЧ-резонатор. Патент России № 1741201 от 10.01.93.
10. Родионова В. Н., Слепян Г. Я. // РЭ. 1986. Т. 31, № 10. С. 1915–1921.
11. Родионова В. Н., Слепян Г. Я., Лук Л. Н. Коаксиальный диэлектрический резонатор. А. с. 1327241 от 18.11.85.
12. Лук Л. Н., Родионова В. Н., Слепян Г. Я. // ЖТФ. 1988. Т. 58, вып. 3. С. 594–596.
13. Родионова В. Н., Слепян Г. Я. // РЭ. 1989. Т. 34, № 8. С. 1767–1769.

14. *Rodionova V. N., Slepyan G. Ya.* // СРЕМ'94. Abstracts-Boulder, USA. 1994. P. 35.
15. *Родионова В. Н., Слепян Г. Я.* // РЭ. 1989. Т. 34, вып. 7. С. 1358–1365.
16. *Родионова В. Н., Слепян Г. Я.* // РЭ. 1991. Т. 36, вып. 8. С. 1382–1385.
17. *Kuraev A. A., Natarov M. P., Rodionova V. N., Slepyan G. Ya.* // Intern. J. Electron. 1991. Vol. 70, № 5. P. 1005–1014.
18. *Родионова В. Н., Резникова Е. М.* Устройство связи объемного резонатора. А. с. 1262608 от 02.08.84.
19. *Rodionova V. N., Slepyan G. Ya.* // Electron. Letters. 1991. Vol. 27, № 16. P. 1427–1428.
20. *Natarov M. P., Popkova T. L., Rodionova V. N., Slepyan G. Ya.* // J. of Com. Techn. And Electron. 1994. № 39. P. 39–45.
21. *Rodionova V. N., Slepyan G. Ya.* // IGARS-91. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symposium: Abstracts. Finland, Helsinki, 1991. P. 146.
22. *Карпович В. А., Родионова В. Н., Слепян Г. Я.* // Международный аграрный журнал. 1999. № 5. С. 29–30.
23. *Карпович В. А., Родионова В. Н., Слепян Г. Я., Новикова О. Т.* // Международный аграрный журнал. 200. № 3. С. 8–10.

RESEARCH, DESIGN AND DEVELOPMENT IN MICROWAVES: RESONANCE SYSTEMS, DEVICES AND EQUIPMENT

V. N. Rodionova, V. A. Karpovich, G. Ya. Slepyan

We suggest our services in designing and manufacturing microwave devices and components with the needed performances in different frequency ranges and waveguide channels.

We work in the field of microwave technique approximately 25 years. We design and manufacture noise measurement systems for high sensitivity measurement of amplitude and phase noise of components of radar and communication systems (oscillators, local oscillators, amplifiers, mixers) at frequency range from 1 to 180 GHz. For this purpose we worked out microwave components (coaxial, microstrip, waveguide) in this frequency range: resonators, detectors, mixers, local oscillators, attenuators, phase shifters, directional couplers, switches, matched load and others. The main advantages of this components are wide frequency range, small insertion loss, low noise level of oscillators, very high Q-factor of resonators.

Except to outlined microwave components we may propose microwave measurement system for: measuring of phase and amplitude noise of microwave signals, measuring of dielectric parameters of various materials and so on as cm- and mm-wave range (1...180 GHz) as submm-wave range (180–405 GHz).

The high Q-factor resonators are used to make the high-quality generators of the radar and navigation systems, to carry out the spectrum and frequency measurements, to measure the material parameters, to carry out the physical investigations.

The microwave resonators are applied at the microwave electronic: the resonance and stabilization generator systems, at the measurement technique: wavemeters, filters, signal spectrum measurement systems, frequency discriminators, at the experimental physics: spectroscopy, material parameter measurement systems; as well at the elementary particles accelerators, golography, radioastronomy, etc.

Main technical parameters are : frequency range 0.6...180 GHz; Q-factor 60 000...100 000; VSWR <1.5; resonator types (23 models) cylindrical, coaxial, cylindrical, open quasyoptical, corrugated.

The resonators are made of thermostable material, the inside surface – silver or gold. They have small weight and dimensions. There is the electronic tuning of frequency.

The quality of the radar and communication systems is mainly determined by the noise characteristics of their components – oscillators, local oscillators, amplifiers, mixers.

We propose the noise measurement systems to make high sensitivity measurement of the amplitude and phase noise of the radar and communication systems components oscillators, amplifiers, mixers. The amplitude noise measurement is realized in the circuitry of the microwave amplitude detector with the input power – 100 mW. The phase noise measurement is realized in the circuitry of the two-channel frequency discriminator with the input power – 1 mW.

Main technical parameters are the followings:

- the frequency range: from 1.0 to 118.1 GHz (9 models);
- the sensitivity of measurement at the 10 kHz offset frequency
 - for amplitude noise: from minus 150 dB/Hz to minus 165 dB/Hz for the various models,
 - for phase noise: from minus 110 dB/Hz to minus 145 dB/Hz for the various models;
- input microwave power
 - for the amplitude noise measurement: from 100 mW,
 - for the phase noise measurement: from 1 mW.

The preliminary investigations made in the Research Institute for Nuclear Problems of Belarussian State University demonstrates that application of microwave energy makes it possible:

- a) to destroy of the seed and infection diseases (Corinobacterium, Fusarium oxysporum, Botritis cineerea, Sclerotinia sclerotinian and others);
- b) to increase of the seed germinating power;
- c) to sterilize of the soil and mineral substrate used in the hothouse for growing of tomatoes, cucumbers, peppers, flowers, etc., therewith the soil ferment activity is preserved;
- d) to increase the yield capacity tomatoes, cucumbers, peppers, etc. (10–15 %)

For some years we have engaged in doing research in to the creation of microwave technology of before-sowing processing of the seeds of the vegetable crops (tomatoes, cucumbers, cabbages and others). This microwave technology makes it possible:

- to destroy the seed infection diseases;
- to increase the seed germinating power;
- to augment the photosintez apparatus of the plants;
- helps quicker growth of the plants;
- to increase the yield capacity.

The basis for this technology is the information influence of the low level power microwave energy on the biological objects. This influence allows to raise the seed germinating power and the plant immunity. Application of the microwave energy for the seed the productivity has increased on 10–12 %. New effective biotechnology of the before sowing seed treatment is ecologically safe and it needs a little of energy. Nowadays low intensity of the technology of the before sowing processing of the seeds of the vegetable crops is the successfully application from processed seeds in the Belorussian hothhouse farms.