

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА СПЕЦИАЛЬНЫХ ВЫСОКОДОБРОТНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ СИСТЕМ И МИКРОВОЛНОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

**В. А. Карпович, Г. Я. Слепян, В. Н. Родионова, Г. И. Волынец,
А. А. Савук, О. В. Танана, И. А. Гринчук**

Резонансные системы широко применяются в современной радиотехнике для частотной фильтрации электромагнитных колебаний, реализации обратной связи при их усилении и генерации. Явление резонанса и резонансные системы широко используются при измерении характеристик материальных сред, для создания различных промышленных установок и оборудования, в основе которых лежит принцип накопления электромагнитной энергии в резонансном объеме.

Наиболее актуальными задачами, возникающими при теоретическом и экспериментальном исследовании принципов создания резонансных систем в СВЧ диапазоне, являются разработка методик расчета широкополосных элементов связи резонансных систем с одноименными волноводами и техническое приложение полученных результатов для разработки установок для измерения электродинамических характеристик композитных материалов в СВЧ диапазоне, а также технологического оборудования для микроволнового нагрева, стерилизации, сушки различных диэлектрических материалов.

1. Новые типы элементов связи высокодобротных резонансных систем и прямоугольных волноводов

Одним из главных требований, предъявляемых к универсальному измерительному резонатору, является высокая собственная добротность в сочетании с широким диапазоном перестройки частоты. Поэтому весьма важным является вопрос о широкополосном элементе связи этого резонатора с СВЧ-трактом. В настоящее время ведется активный поиск оптимальных устройств связи с линиями передачи [1–6]. Практическая реализация бездиафрагменных элементов связи в коротковолновой части длин радиоволн вызывает технологические трудности изготовления [7, 8]. Совершенствование технологии и конструкции может эти трудности уменьшить, но представляет интерес и поиск новых физических принципов реализации элемента связи резонатора с прямоугольным волноводом в данном диапазоне частот. Один из таких принципов – использование в качестве элемента связи полупрозрачной решетки и разработка устройства связи на основе сужающегося волновода. Одним из главных достоинств таких элементов является возможность управлением добротностью связи $Q_{св}$ в широких пределах путем вариации конструктивных параметров. Другое существенное качество – повышенная технологичность (решетка может быть нанесена на диэлектрическую подложку и изготовлена средствами микроэлектроники), а сужающийся волновод может быть гальванически «нарощен» на технологическую оправку.

Конструкция элемента связи на основе полупрозрачной решетки показана на рис.1. Поле в волноводе записывается аналогично [9] в виде

$$\vec{H} = \frac{\vec{x}_0}{W_0} \frac{h_1}{k} \exp(-jh_1 z) A_1 \sin\left(\frac{\pi}{a} x\right), \quad (1)$$

где h_1 – постоянная распространения основной волны; W_0 – волновое сопротивление свободного пространства; k – волновое число волны в среде; x – декартова координата; a – размер широкой стенки волновода; A_1 – амплитудный коэффициент, выражаемый равенством

$$A_1 = -\frac{1}{N_1} \int (\vec{y}_0 \vec{E}) \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) dS, \quad (2)$$

S_0 – апертура решетки (прямоугольник $c \times a'$); \vec{E} – поле в апертуре решетки; N_1 – норма волны; \vec{x}_0, \vec{y}_0 – единичные векторы.

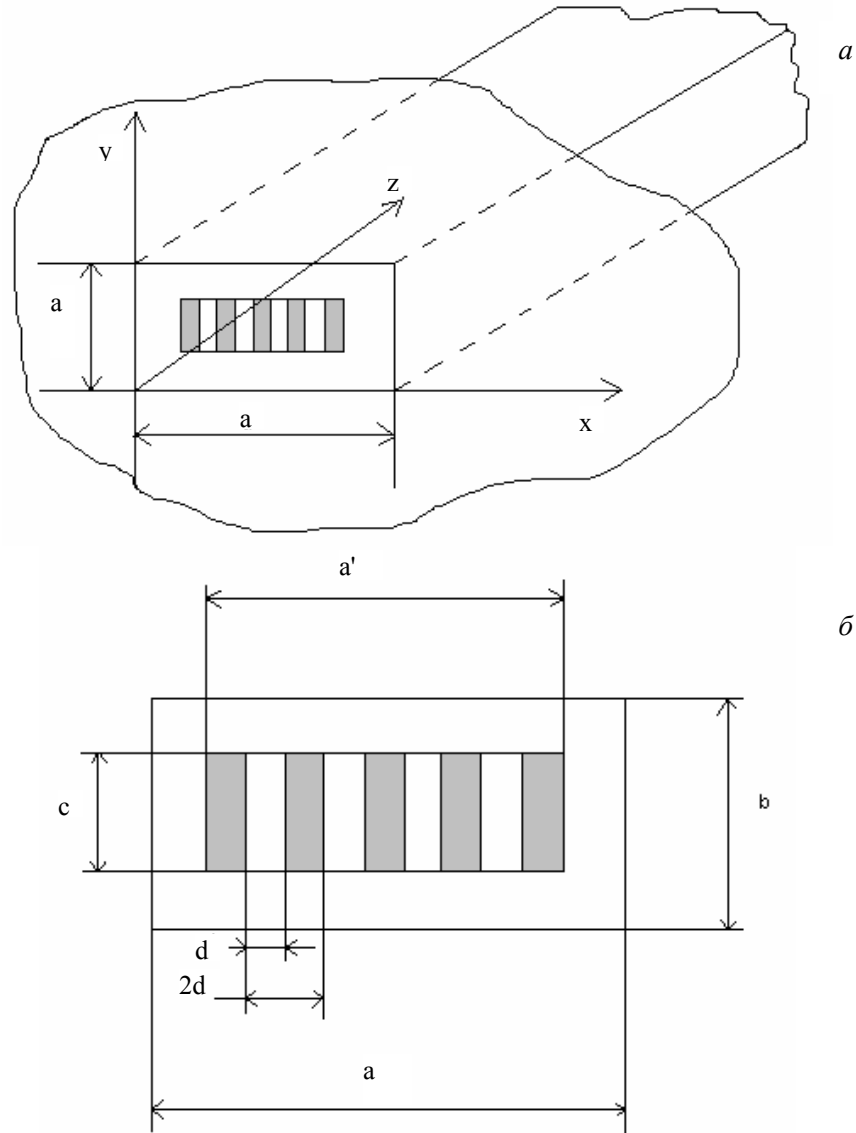


Рис. 1. Конструкция элемента связи: а – решетка связи в прямоугольном волноводе; б – конфигурация решетки связи

Вначале вычислим A_1 в пренебрежении диэлектрической подложкой, а затем выведем поправочный коэффициент, учитывающий ее влияние. Воспользуемся двухсторонними граничными условиями импедансного типа, имеющими в наших обозначениях вид [10]

$$E_y^+ - E_y^- = \frac{jk l_0}{2} W_0 (H_x^+ - H_x^-), \quad (3)$$

$l_0 = \frac{2d}{\pi} \ln\left(\frac{1}{\cos\theta}\right)$, где $\theta = \pi\alpha/2d$, α – полуширина ленты, d – полупериод решетки, индексами \pm обозначены поля внутри резонатора и волновода соответственно.

Особый интерес для элемента связи представляет частный случай редкой решетки, когда $\theta \ll 1$. Тогда $\cos\theta \cong 1 - \theta^2/2$ и для l_0 получаем приближенное равенство $l_0 \approx \pi\alpha^2/4d$. В этом приближении является оправданным использование упрощенного граничного условия (3) вместо более полной системы граничных условий, также приведенной в [10].

Используя (3), получаем

$$|A_1| = \frac{kl_0 W_0 c}{N_s} H_{0x} \int_0^{a'/2} \cos \frac{\pi x'}{a} dx' = \frac{kl_0 W_0 a c H_{0x}}{\pi N_s} \sin\left(\frac{\pi a'}{2a}\right), \quad (4)$$

H_{0x} – поле рабочего колебания резонатора на поверхности решетки. Для сравнения приведем формулу для $|A_1|$ в случае круглого отверстия [7]:

$$|A_1| = \frac{4}{3} r^3 \omega \mu_0 H_{0x} \frac{1}{N_s}, \quad (5)$$

где r – радиус отверстия, $\omega = 2\pi f$, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

Сравнивая (5) с (4), мы приходим к заключению, что решетка эквивалентна круглому отверстию связи с эффективной магнитной поляризуемостью

$$M_{эф} = l_0 c I = \frac{l_0 a c}{\pi} \sin\left(\frac{\pi a'}{2a}\right). \quad (6)$$

Возможен также и другой способ вычисления $M_{эф}$, основанный на формуле для магнитной поляризуемости одиночной узкой щели с прямоугольной апертурой ($M \approx 4\pi\alpha^2 c/16$). Тогда

$$M_{эф} \cong \frac{\pi}{16} \frac{4\alpha^2 c}{2d} \sum_{p=1}^N 2d \sin\left[\frac{\pi}{a}(x_p + 2pd)\right], \quad (7)$$

где N – число щелей в решетке. Суммируя конечный ряд в (7), приходим к равенству $M_{эф} \approx \pi\alpha^2 c I/4d$, при условии $\theta \ll 1$ совпадающему с (6). Подобное

совпадение формул, полученных из различных исходных предпосылок, является дополнительным свидетельством правильности произведенных выкладок.

Перейдем к учету влияния диэлектрической подложки (рис. 2). Прежде всего отметим, что для поля рассматриваемой поляризации (электрическая компонента параллельна щелям) наличие на поверхности решетки границы раздела сред с различными ε не изменяет граничного условия (3) [12, 13].

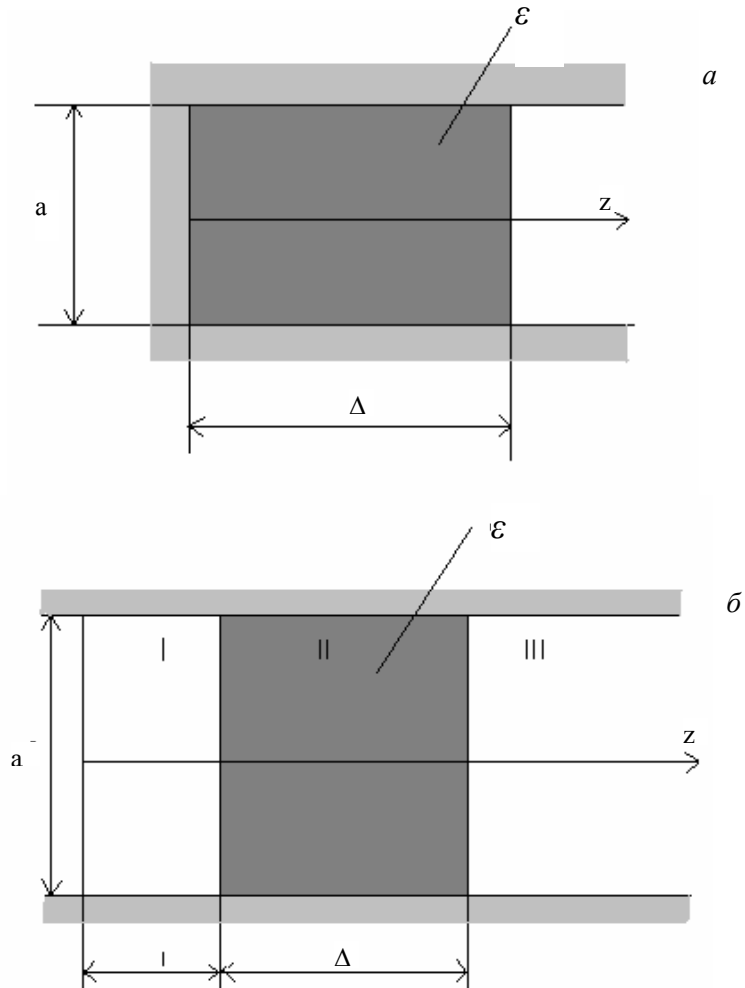


Рис. 2. Геометрия модельной задачи для возбуждения полубесконечного волновода с диэлектрической пластиной магнитным током: *a* – схема возбуждения магнитным током, расположенным на торцевой стенке; *б* – конфигурация частичных областей для решения ключевой задачи

Наличие подложки приводит к изменению амплитуды волн, возбуждаемых элементом связи, за счет эффектов парциального отражения от двух границ подложки. Чтобы учесть этот эффект фактически нам необходимо рассмотреть ключевую задачу о возбуждении полубесконечного прямоугольного волновода с диэлектрической пластиной магнитным током, расположенным на торцевой

стенке (рис. 2, а). Анализ удобно начать с более общей структуры (рис. 2, б) и лишь потом перейти к пределу $l \rightarrow 0$. Используем метод частичных областей; частичные области показаны на рис. 2, б римскими цифрами. Поля n -й собственной волны в каждой из частичных областей представляются в виде

$$\left. \begin{aligned} f_n^I(z) &= A_n \exp(jh_n z) + B_n \exp(-jh_n z), \\ f_n^{II}(z) &= C_n \exp(jh_n^\varepsilon z) + D_n \exp(-jh_n^\varepsilon z), \\ f_n^{III}(z) &= E_n \exp(jh_n z), \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

где B_n, C_n, D_n, E_n – неизвестные коэффициенты, $h_n = \sqrt{k^2 - (n\pi/a)^2}$, $h_n^\varepsilon = \sqrt{k^2 \varepsilon - (n\pi/a)^2}$, $A_n = \frac{j\varepsilon_0}{h_n} \int_{\Sigma} \vec{f} \vec{F}_n d\Sigma$ – амплитуда n -й волны в волноводе без

пластины, вычисленная по методике [11] (\vec{f} – плотность магнитного тока, \vec{F}_n – n -я собственная функция магнитного вектор-потенциала). Цель проводимых ниже вычислений – выразить E_n через A_n , пользуясь граничными условиями на границах раздела частичных областей. Они элементарны, поэтому сразу приведем окончательный результат. В пределе $l \rightarrow 0$ получаем

$$E_n = A_n \exp[j(h_n^\varepsilon - h_n)\Delta] \left(\frac{a_n - b_n}{a_n - b_n e^{2jh_n^\varepsilon \Delta}} \right), \quad (9)$$

где $a_n = (1 + h_n^\varepsilon/h_n)^2$, $b_n = (1 - h_n^\varepsilon/h_n)^2$.

Из (9) получаем $|E_n|^2 = \beta_n |A_n|^2$, где $\beta_n = \frac{(a_n - b_n)^2}{a_n^2 + b_n^2 - 2a_n b_n \cos(2h_n^\varepsilon \Delta)}$.

Введя обозначение $y_n = \left(\frac{h_n^\varepsilon}{h_n} \right)^2$, можно переписать β_n в виде

$$\beta_n = \frac{1}{1 + \frac{(1 - y_n)^2}{4y_n} \sin^2(h_n^\varepsilon \Delta)}. \quad (10)$$

Равенство (10) фактически решает поставленную задачу. Для нас представляет интерес частный случай его при $n = 1$, характеризующий основную волну. Для него окончательный результат представляется в виде

$$\beta_1 = \beta \approx \left\{ 1 + \frac{\left(\varepsilon - 1 \right)^2 \sin^2 \left[k\Delta \sqrt{\varepsilon - \left(\frac{\pi}{ka} \right)^2} \right]}{4 \left[1 - \left(\frac{\pi}{ka} \right)^2 \right] \left[\varepsilon - \left(\frac{\pi}{ka} \right)^2 \right]} \right\}^{-1} \quad (11)$$

Соотношение (11) есть форма решения, наиболее удобная для численных оценок и качественного анализа. В соответствии с ним, учет влияния подложки сводится к замене $M_{эфф} \rightarrow \sqrt{\beta} M_{эфф}$. Далее, для $Q_{св}$ можно применить соотношение, полученное для диафрагменных элементов в [7]:

$$Q_{св} \approx \frac{ab\lambda^2 L^2}{32\pi\beta M_{эфф}^2 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \sqrt{\frac{L}{2r_0} \left(1 - \frac{L}{2r_0}\right)}}, \quad (12)$$

где a и b – размеры выходного волновода, λ – длина волны, r_0 – радиус кривизны зеркал, L – расстояние между зеркалами, $M_{эфф}$ – определяется равенством (6), а коэффициент β – соотношением (11). Проанализируем физический смысл соотношения (12). Из него видно, что управлять величиной $Q_{св}$ в широких пределах можно, варьируя $M_{эфф}$ путем изменения как размеров решетки a', c , так и коэффициента заполнения $\frac{\alpha}{d}$. Последнее остается единственной возможностью, если из конструктивно-технологических соображений решетку целесообразно выполнить занимающей все сечение волновода ($a' = a$, $b = c$). Далее, так как $\beta \leq 1$, влияние подложки приводит к деполяризации решетки и, как следствие, уменьшению связи при тех же геометрических размерах элемента. Для диэлектриков типа «поликор» ($\varepsilon \approx 10$) уменьшение связи может быть существенным, но его можно компенсировать, выбирая толщину подложки в соответствии с условием

$$k\Delta \sqrt{\varepsilon - \left(\frac{\pi}{ka}\right)^2} = \pi.$$

Полная компенсация возможна только на определенной частоте, но частичная компенсация реализуема в достаточно широком диапазоне.

Диэлектрические подложки позволяют существенно повысить рабочие частоты диафрагменных элементов связи, описанных в [7]. Ограничения на их рабочие частоты, как известно, связаны с уменьшением размера отверстия при росте частоты технологическими трудностями их изготовления. Подложка позволяет реализовать заданное $Q_{св}$ при большем размере отверстия и изготовить диафрагменный элемент средствами микроэлектроники. При этом в качестве материала подложки целесообразно использовать вещества со значительными ε (например, поликор), а оптимальную толщину выбрать в соответствии с условием

$$k\Delta_{opt} \sqrt{\varepsilon - \left(\frac{\pi}{ka}\right)^2} = \frac{\pi}{2},$$

где k соответствует средней частоте рабочего диапазона.

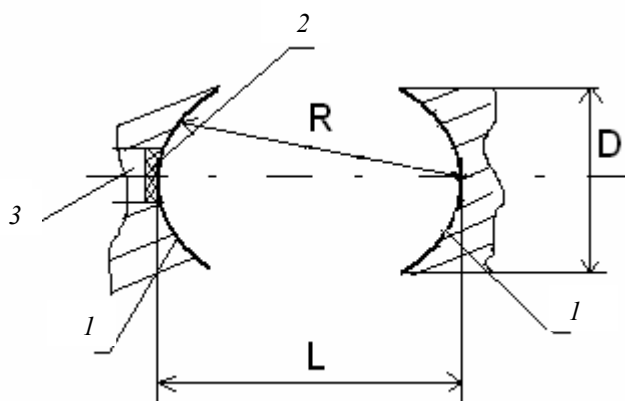


Рис. 3. Конструкция резонатора с элементом связи: 1 – зеркала ОР; 2 – элемент связи; 3 – возбуждающий волновод

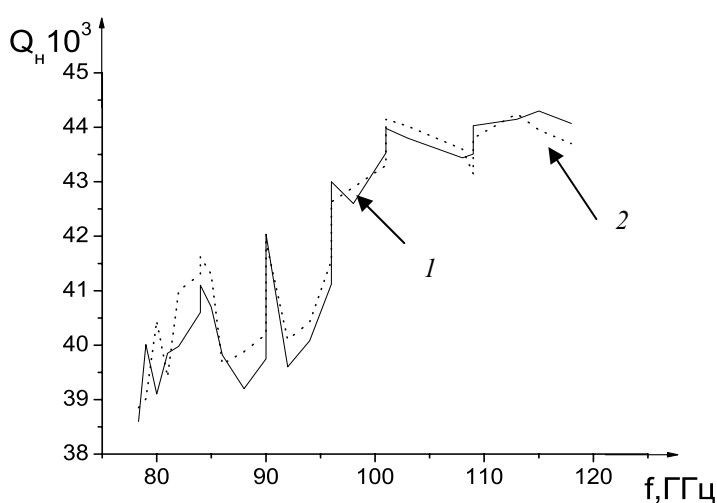


Рис. 4. Экспериментальные данные добротности открытого резонатора с различными устройствами связи: 1 – резонатор с плоской щелевой решеткой; 2 – резонатор с диафрагменным устройством связи

Параметром, характеризующим оптимальное согласование резонатора с СВЧ-трактом, является величина коэффициента стоячей волны (КСВ). Измерение КСВ проводили по стандартной методике [14].

Измерение КСВ производилось для устройства связи на основе дифракционной решетки, которая была установлена в открытый резонатор, в диапазоне частот 78–118 ГГц (рис.3).

Кроме измерения КСВ, экспериментально исследовался также и один из важнейших параметров – добротность резонатора (Q).

Результаты экспериментальных исследований приведены в табл. 1.

Результаты экспериментальных исследований ОР с новым элементом связи

f , ГГц	$L_{пр}$, дел	КСВ	Q_n
78.33	0.01	1.25	38600
79.01	1.38	1.6	40010
80.0	2.96	1.21	39100
81.0	4.82	1.3	39850
82.0	6.43	1.34	39980
84.0	9.7	1.41	40600
84.0	0.78	1.48	41100
85.0	2.42	1.38	40700
86.0	4.07	1.23	39820
88.0	7.34	1.18	39200
90.0	10.38	1.22	39750
90.0	0.68	1.37	42040
92.0	4.0	1.14	39600
94.0	7.16	1.26	40080
96.0	10.81	1.39	41120
96.0	0.42	1.48	43000
98.0	3.93	1.33	42600
101.0	9.75	1.46	43530
101.0	1.05	1.52	43980
103.0	3.7	1.54	43800
108.0	9.85	1.34	43440

На рисунке 4 приведены сравнительные экспериментальные данные нагруженной добротности Q_n резонатора с элементом связи на основе плоской решетки и нагруженной добротности резонатора с диафрагменным элементом связи в диапазоне 78–118 ГГц. Анализируя результаты, можно констатировать, что применение решетки практически не ухудшило нагруженную добротность резонатора.

Представляют также значительный интерес бездиафрагменные элементы связи через плавнерегулярные волноводные переходы. Такие элементы связи обеспечивают более высокую селекцию возбуждения мод, чем элементы с малыми отверстиями.

Рассматривались два типа резонаторов: резонатор с двумя идентичными сферическими зеркалами (рис. 5) и резонатор, одно из зеркал которого сферическое, а другое – плоский диск (рис. 6).

Элемент связи расположен в центре зеркала и представляет собой узкую щель размером $2a_1 \times b$ ($2a_1 \ll b$). К щели подсоединен плавный волноводный переход к волноводу связи стандартного сечения, ориентированный ортогонально поверхности зеркала. Плавный переход характеризуется законом нерегулярности $a = a(z)$, $b = const$, который в теоретическом анализе мы будем предполагать произвольным.

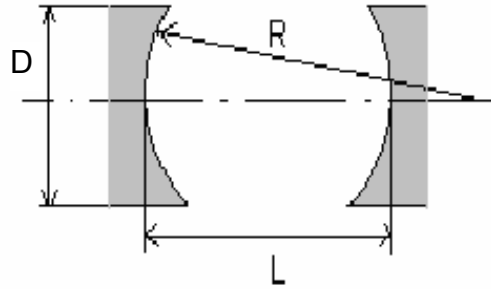


Рис. 5. Геометрия резонатора с двумя сферическими зеркалами

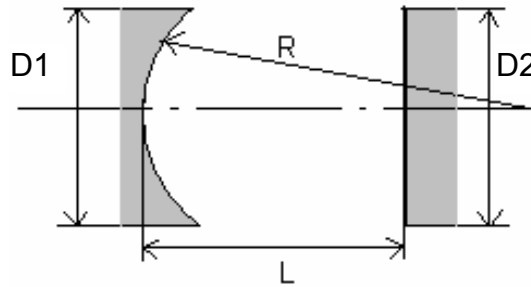


Рис. 6. Геометрия резонатора с одним сферическим и одним плоским зеркалом

Важнейшим физическим параметром элемента связи является добротность связи отдельного собственного колебания TEM_{0nq} , выражаемая соотношением:

$$Q_{CB} = \pi f_0 N / \Sigma, \quad (13)$$

где f_0 – резонансная частота; Σ – средняя за период мощность, поступающая из резонатора в волновод связи; N – норма колебания.

Конфигурация модельной задачи для электродинамического анализа элемента связи показана на рис 7.

В работе [15] приведен расчет добротности такого элемента связи. Предложено перейти от реального элемента связи к его прототипу, в котором узкие «электрические» стенки заменяются «магнитными» стенками. Это позволило перейти от сложной трехмерной электродинамической задачи к ключевой двумерной задаче, решаемой более простыми методами. Такой подход нашел широкое применение при расчете матриц рассеяния различных неоднородностей в микрополосковых линиях (модели Олинера [16]). Оказывается, что пределы его применимости значительно шире интегральных схем СВЧ: в частности, он может быть применен в задачах связи квазиоптических открытых резонаторов с прямоугольными волноводами.

Условие физической эквивалентности прототипа данному элементу связи заключается в равенстве волноводных импедансов рабочих мод в соответствующих сечениях элемента связи и его прототипа. Для этого размер широкой

стенки прототипа должен быть равен $b_{011} = b\nu$, где $\nu = (1 - (\lambda/2b)^2)^{1/2}$. Структура поля рабочих колебаний TEM_{0nq} в резонаторе практически не будет меняться, если «магнитные» стенки будут продолжены в резонатор. В частности, такая олинеровская модель позволяет вычислить Σ в волноводе. Мы представляем колебания в резонаторе, когда трехмерные гауссовские пучки в ключевой задаче переходят в плоские волны: по оси x в виде гауссовского пучка, а по оси y в виде волноводного. Σ будет такой же, как и в случае дифракции одного луча на одном зеркале с элементом связи, т. е.

$$\Sigma = \frac{2a_0 |T_0|^2 E_0^2 b \nu d}{W_0 L}, \quad (14)$$

где $2d$ – фокусное расстояние; $W_0 = 120\pi\Omega$; T_0 – коэффициент передачи.

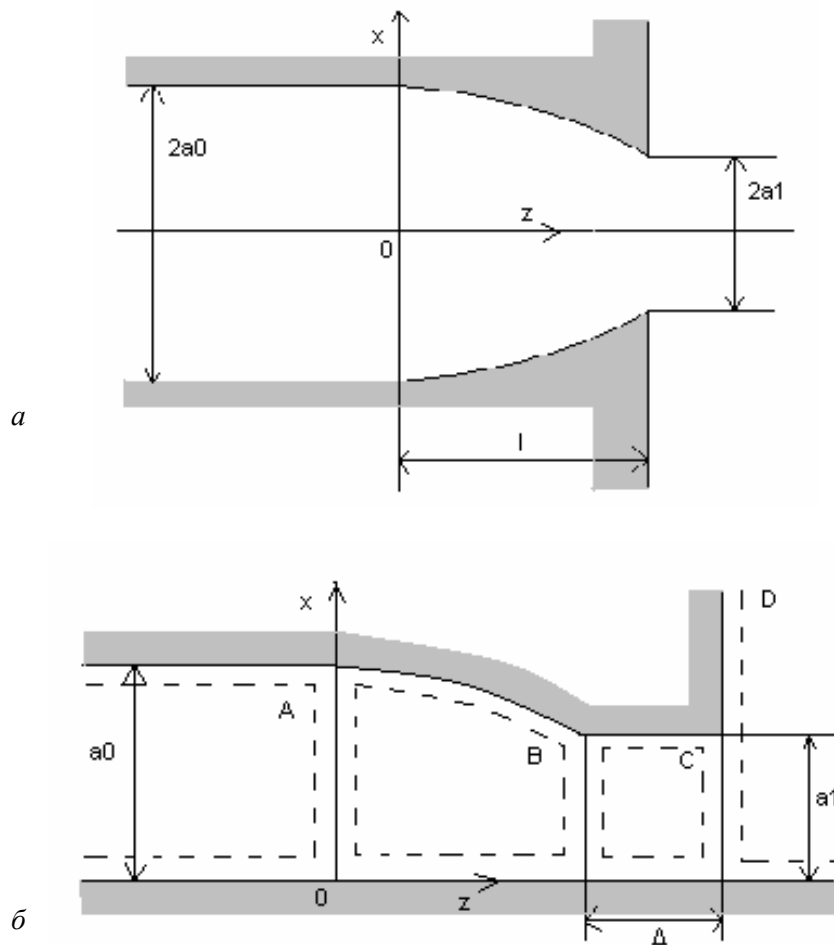


Рис. 7. Модельные задачи для электродинамического анализа элемента связи

Следовательно, для Q_{CB} :

$$Q_{CB} = \frac{\pi L^2}{\alpha \nu a_0 b |T_0|^2} \left(\frac{L}{\alpha R} \left(1 - \frac{L}{\alpha R} \right) \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (15)$$

где L – расстояние между зеркалами; R – радиус кривизны зеркал; α – коэффициент, зависящий от типа резонатора ($\alpha = 2$ для резонатора a ; $\alpha = 1$ для резонатора b).

Индексы собственного колебания n, q входят в \sum через L и T_0 : эти величины вычисляются на резонансных частотах, определяемых индексами n, q . Использование формулы для \sum требует вычисления или оценки $|T_0|^2$ из вспомогательной ключевой задачи. Простые аналитические оценки его затруднительны, но возможен высокоэффективный и строгий численный метод.

Формулы для \sum и Q_{CB} неприменимы в узких окрестностях частот вырождения диагонализированной кратности. Это связано с тем, что их вывод основан на теории малых возмущений (элемент связи мало изменяет величины ω_0 и N).

Для вычисления T_0 было проведено решение ключевой задачи, показанной на рис. 7, a , заключающееся в решении двумерного уравнения Гельмгольца:

$$\nabla_{xz}^2 \varphi + k^2 \varphi = 0,$$

для y – компоненты магнитного поля ($\varphi = H_y$), удовлетворяющей граничному условию Неймана на поверхности структуры, условию излучения на бесконечности и условию Мейкснера на ребре.

Вначале рассматривали модифицированную структуру, показанную на рис. 7, b ; к пределу $\Delta \Rightarrow 0$ переходили на заключительной стадии решения.

Подобная модификация рассматриваемой геометрической области часто используется в полуаналитических методах решения краевых задач электродинамики [17, 18] (полуобращение, метод вычетов, метод обобщенных матриц рассеяния и т. д.). Суть ее в том, что она позволяет легко выделить часть полного оператора, подлежащую аналитическому обращению. Применили неполный метод Галеркина с полуобращением сингулярных операторов в граничных условиях. Процедура полуобращения идентична предложенной в работе [19]. В областях A и C применялось разложение по собственным волнам регулярного волновода. В области $D(z > 1 + \Delta)$

$$\varphi(x, z) = \int_0^{\infty} A(\alpha) \cos \alpha x \exp(-\gamma(z-1-\Delta)) d\alpha + 2A_0 \cos k(z-1-\Delta), \quad (16)$$

где A_0 – амплитуда падающей плоской волны, $\gamma = \sqrt{\alpha^2 - k^2}$; $A(\alpha)$ – неизвестная спектральная амплитуда.

В нерегулярной области B использовали разложение

$$\varphi(x, z) = \sum_{n=0}^{\infty} P_n(z) \cos \frac{n\pi}{a(z)} (x - a(z)), \quad (17)$$

где $\bar{P} = \{P_n(z)\}$ – неизвестная вектор-функция.

Для нее при помощи стандартной схемы неполного метода Галеркина [20] получили систему собственных дифференциальных уравнений:

$$\bar{P}''(z) + H(z)\bar{P}'(z) + B(z)\bar{P}(z) = 0, \quad (18)$$

где $H(z), B(z)$ – заданные матрицы-функции.

Сшивание полей на границах частичных областей $z = 0, z = L, z = L + \Delta$ приводит к следующей системе равенств:

$$\begin{cases} \bar{P}'(0) + (\zeta_0 - \Gamma_0)\bar{P}(0) = 0, \\ \bar{P}(0) = \bar{T}, \\ \bar{P}'(l) + (\zeta_1 - \Gamma_1)\bar{P}(l) = 2\Gamma_1 E^+ \bar{c}, \\ \bar{P}(l) = E^- \bar{b} + E^+ \bar{c}, \end{cases} \quad (19)$$

$$\int_0^{\infty} A(\alpha) \cos \alpha x d\alpha + 2A_0 = \sum_{n=0}^{\infty} (c_n + b_n) \cos \frac{n\pi}{a_1} x, \quad 0 < x < a_1$$

$$\int_0^{\infty} A(\alpha) \gamma \cos \alpha x d\alpha = \sum_{n=0}^{\infty} (c_n - b_n) \gamma_n^{(1)} \cos \frac{n\pi}{a_1} x, \quad 0 < x < a_1$$

$$\int_0^{\infty} A(\alpha) \gamma \cos \alpha x d\alpha = 0, \quad a_1 < x < \infty$$

где \bar{T} – вектор амплитуд собственных волн, уходящих от нерегулярного участка в области A ; $\bar{b} = \{b_n\}, \bar{c} = \{c_n\}$ – векторы амплитуд соответственно прямых и встречных собственных волн в области C ; Γ и E – диагональные матрицы с элементами:

$$\Gamma_{0,1mn} = \delta_{mn} \gamma_n^{(0,1)}, \gamma = \sqrt{\alpha^2 - k^2},$$

$$\gamma_n^{(0,1)} = \sqrt{(n\pi/a_{0,1})^2 - k^2}, E_{mn} \pm = \delta_{mn} \exp(\mp \gamma_n^{(1)} \Delta)$$

δ_{mn} – символ Кронекера. Выражения для элементов матриц $\zeta_0, \zeta_1, H(Z), B(Z)$ приведены в работе [21].

Следующий этап состоял из исключения \bar{b} и \bar{c} из (7) (т. е. выражения их через $\bar{P}(l)$). В результате получается граничное условие для \bar{P} при $z = 1$, которое образует двухточечную краевую задачу для вектор-функции $\bar{P}(z)$. Это граничное условие имело вид

$$\bar{P}'(l) + (\zeta_1 - \Gamma_1)\bar{P}(l) + \Gamma_1 V^{-1} \bar{P}(l) = \Gamma_1 V^{-1} \Gamma_1^{-1} QW^{-1} \bar{r}, \quad (20)$$

где $V = I + \Gamma QW^{-1} Y$.

$$Y_{pn} = F_n^{\nu} (n\pi) = \frac{J_{2\nu}(n\pi)}{(2n\pi)^{\nu}}, \nu = \frac{\pi + 2\text{arctg}(a'l)}{6\pi + 4\text{arctg}(a'l)}.$$

$J_{\mu}(x)$ – функция Бесселя порядка μ ;

$$\begin{aligned}
Q_{nm} &= -(2 - \delta_{n0})\pi F_m(n\pi), W = W^{(1)} + W^{(2)}; \\
W_{pm}^{(1)} &= -a_1 2^{-4\nu} \frac{\Gamma(1+2\nu)\Gamma(m+p)(1-\delta_{p+m,0})}{\Gamma(1+m-p+\nu)\Gamma(1-m+p+\nu)\Gamma(1+m+p+2\nu)} - \\
& - \frac{\pi\delta_{p0}\delta_{m0}}{2^{4\nu+1}\Gamma^2(\nu+1)\gamma_0^{(1)}} + a_1 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{F_p^{(\nu)}(n\pi)F_m^{(\nu)}(n\pi)}{n\pi}, \\
W_{pm}^{(2)} &= -2a_1 \int F_p^{(\nu)}(\alpha a_1)F_m^{(\nu)}(\alpha a_1)q_{mp}(\alpha)d\alpha + a_1 \sum_{n=1}^{\infty} F_p^{(\nu)}(n\pi)F_m^{(\nu)}(n\pi)\varepsilon_n, \\
\varepsilon_n &= \frac{1}{\gamma_n^{(1)}a_1} - \frac{1}{n\pi}, \\
q_{mp}(\alpha) &= \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{\alpha}\right) + \delta_{m+n,0} \frac{1}{\alpha},
\end{aligned}$$

где $\Gamma(x)$ – гамма-функция.

Вектор r характеризует возбуждающий источник и определяется

$$r_n = 2A_0 F_n^{(\nu)}(0).$$

Для численного решения полученной краевой задачи была выполнена редукция всех матриц и векторов к их конечномерным аналогам [21]. После этого был использован метод направленной ортогонализации.

Интегралы в $W_{pm}^{(2)}$ представлялись рядами по степеням ka_1 , которые с привлечением двойной точности эффективно суммируются до $ka_1 < 10$. Суммирование медленно сходящихся рядов в $W_{pm}^{(1)}$ проводилось по методике [22].

Искомый коэффициент T_0 выражается через решение ключевой задачи равенством $T_0 = P_0(0)$.

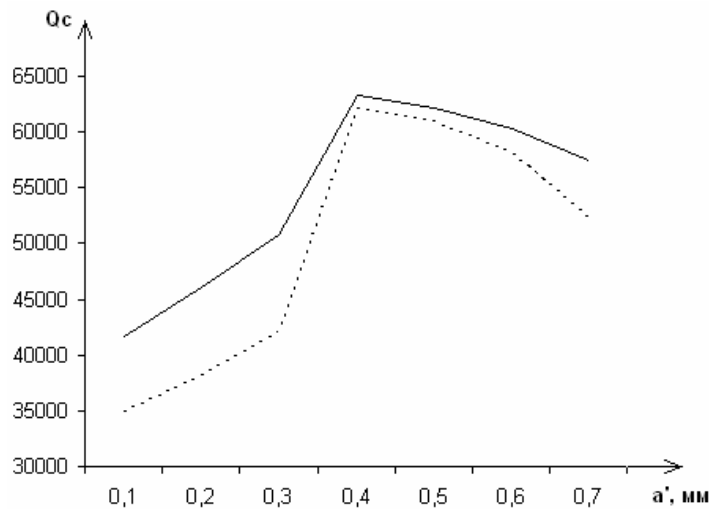


Рис. 8. Расчетная зависимость добротности связи от размера a_1 окна связи

Размеры плавных возбуждающих волноводов

Сечение возбуждающего волновода, $a \times b$, мм	5.2×2.6	2.4×1.8	1.6×0.8
Сечение щели на зеркале, $a_1 \times b$, мм	5.2×0.45	2.4×0.35	1.6×0.25



Рис. 9. Зеркало ОР с плавным волноводным переходом

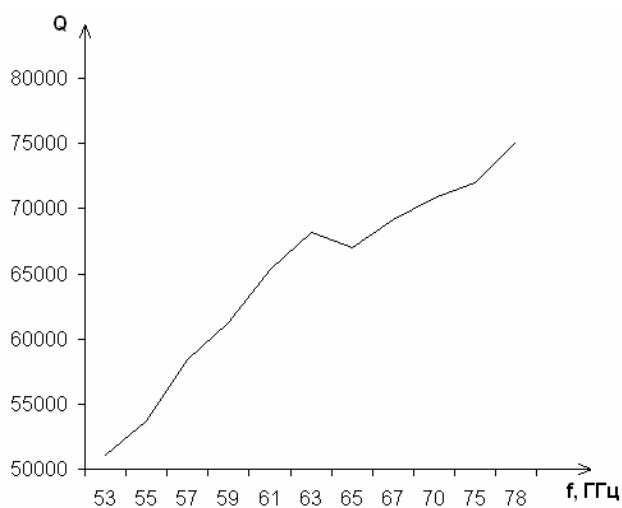


Рис. 10. Экспериментальные результаты частотной зависимости нагруженной добротности исследуемых резонаторов

Результаты расчетов добротности связи открытых резонаторов в диапазонах 53–78 ГГц; 78–18 ГГц; 118–178 ГГц в зависимости от размеров окна связи приведены на рис. 8 (сплошная линия – экспериментальные данные, пунктир – расчетные данные).

Проектировались и исследовались клинообразные нерегулярные переходы с $a(z) = a_0 + (a_1 - a_0)z/l$. В табл. 2 приведены размеры плавных возбуждающих волноводов каждого из ОР.

Параметром, характеризующим согласование резонатора с СВЧ трактом, является величина коэффициента стоячей волны (КСВ). Измерения КСВ проводили по стандартной методике [23]. В качестве источника сигнала использовались высокостабильные твердотельные генераторы, разработанные нами (нестабильность частоты $< 10^{-5}$, выходная мощность > 50 мВт).

На рисунке 9 представлено зеркало ОР с плавным волноводным переходом. Результаты экспериментального исследования нагруженной добротности открытых резонаторов в диапазонах 53–78 ГГц; 78–118 ГГц; 118–178 ГГц приведены на рис. 10.

2. Измерение поглощающих и отражающих характеристик наноразмерных углеродных композитов в СВЧ диапазоне радиоволн

Электродинамика наноразмерных углеродных композитов вызывает в последние годы все возрастающий интерес широким кругом прикладных возможностей для таких сред в современной радиофизике. Прикладные возможности нанокompозитов в значительной степени обусловлены тем, что их материальные характеристики могут кардинально отличаться от материальных характеристик составляющих их компонент. Нанокompозитные среды могут обладать совершенно необычными электромагнитными свойствами, не имеющими аналогов среди естественных сред. Пример – среды с отрицательным значением показателя преломления (так называемые среды Веселаго). Становятся актуальными экспериментальные исследования электромагнитных свойств искусственных нанокompозитов. Методы измерения, применяемые для естественных сред, не всегда могут быть автоматически перенесены на композиты, т. к. их материальные параметры могут варьироваться в широких пределах. Нами разработаны физические методы измерения и экспериментального исследования электрофизических параметров искусственных нанокompозитных сред в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне длин волн.

Для проведения экспериментов была создана схема (рис. 11). В нее включены вентили 2 для обеспечения развязки между различными элементами измерительной схемы (при этом обеспечен уровень переотражений < 0.2 дБ). Атенюаторы 3 включены для обеспечения стабильного уровня мощности (при этом обеспечено $7.0 \text{ мкВт} \pm 10 \text{ мкВ}$). В качестве задающего генератора 1 использован генератор на диоде Ганна (частотная стабильность 10^{-6} , достигнута использованием внешнего стабилизирующего гофрированного резонатора [25, 26] с $Q \cong 10^5$).

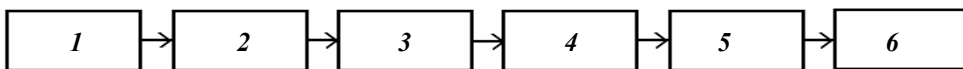


Рис. 11. Структурная схема измерения параметров нанокompозитных образцов:
 1 – генератор Ганна, 2 – вентиль, 3 – аттенюатор, 4 – волновод, 5 – волноводная вставка,
 6 – измеритель мощности

Методика измерений основывалась на использовании схемы замещения [24]. В качестве первого этапа производилось измерение прошедшей мощности P_0 при отсутствии образца. Затем измерялись величины P при наличии образца. Величина ослабления определялась по формуле

$$N = \lg\left(\frac{P_0}{P}\right). \quad (21)$$

При измерении порошковых образцов использовалась волноводная вставка. Вставка представляла собой отрезок стандартного волновода сечением 23×10 мм, длиной 4 мм. Входное и выходное сечения закрывались плоскими слоями фторопласта толщиной 0.1 мм. Выбор фторопласта в качестве материала обусловлен его малыми потерями (ослабление $\leq 0.1 \div 0.2$ дБ). Порошок помещался внутрь вставки и уплотнялся. Уплотнение необходимо для исключения погрешностей, связанных с флуктуациями плотности материала внутри образца и при переходе от одного образца к другому.

Для контроля точности измерений производились повторные измерения при различных ориентациях вставок относительно поперечного сечения волновода.

Углеродные нанотрубки получали по методике, аналогичной описанной в работе [27], углеродные нановолокна – [28]. Нанотрубки получали на катализаторе, содержащем 5 мас. % Co+Mo (1:3), при 940 °С. Первичные продукты отмывали от основной массы катализатора и сушили. Зольность определяли гравиметрическим методом с отжигом на воздухе при 850 °С. Точную величину зольности исследованной партии нанотрубок определить не удалось, однако по аналогии с другими партиями можно говорить, что она находится в пределах 6–8 мас. %. Некоторые свойства продуктов описаны в [29]. Результаты экспериментальных исследований углеродных нанотрубок и нановолокон приведены в табл. 3.

Таблица 3

Величина ослабления углеродных нанотрубок и углеродных нановолокон (РХТУ им. Д. И. Менделеева)

Частота, ГГц	Ослабление: углеродные нанотрубки (...Co-Mo- 5 мг)	Ослабление: углеродные нановолокна диаметр 30–60 нм, зольность 1.46–1.48 %, содержат никель
8.15	43.1	41.0
10.0	44.2	45.5
12.42	42.8	43.2

Как показывают измерения, представленные для экспериментального исследования образцы, имеют перспективы применения для создания миниатюрных неперестраиваемых фильтров для следящих приемников, используемых как пре- и постселекторы, а также при создании частотно-селективных ограничителей мощности, согласованных нагрузок. Основная перспектива применения дешевых углеродных нановолокон – широкополосные радиопоглощающие материалы.

3. Микроволновые технологии

С 1994 г. в НИИ ЯП ведутся исследования в области применения микроволновой энергии для сушки и стерилизации различных продуктов и материалов (древесина, грунт, минеральные субстраты, пищевые продукты, керамика и др.). К настоящему времени достоверно установлена высокая эффективность и экономичность технологий микроволновой сушки и стерилизации. Воздействие электромагнитных волн оказывает избирательное воздействие на патогенные микроорганизмы. Практическим приложением результатов этих исследований явилась разработка оборудования для сушки и стерилизации различных материалов [30, 31, 44]. Эффективность микроволновой стерилизации и сушки подтверждает многолетний начиная с 1996 г. опыт ее применения на предприятиях Республики Беларусь [32–43].

В 2006 г. микроволновая технология стерилизации диэлектрических материалов была награждена дипломом и серебряной медалью на VI Московском международном салоне инноваций и инвестиций.

4. Технология предпосевной биофизической обработки семян льна

Разработанная микроволновая технология предпосевной обработки семян льна – экологически безопасная биотехнология, в основе которой лежит информационное (частотное) воздействие микроволновой энергии малого уровня мощности на биологические объекты.

Это воздействие повышает энергию прорастания и иммунитет растений. Применение данной технологии позволяет уничтожить семенную инфекцию, повысить энергию прорастания семян, усиливает развитие корневой системы, увеличивает фотосинтезирующий аппарат растений, способствует более быстрому развитию растений и более раннему плодоношению.

Применяется при выращивании льна в качестве приема предпосевной активации семенного материала.

Разработка (см. табл. 4) прошла полевые испытания в следующих хозяйствах Республики Беларусь: ОАО «Поставский льнозавод», ОАО «Березинский льнозавод», ОАО «Пуховичлен», Слуцкая льносемястанция, Ляховичская льносемястанция.

Таблица 4

Основные технические характеристики оборудования

Наименование	РКЭС 1
Производительность, т/сутки	1–1,2
Потребляемая мощность, кВтч	1,8
Количество источников эм энергии, шт.	5
Ресурс источника эм энергии, лет	5
Габариты, м (уточняются)	1,5×1,5×3
Вес, кг (уточняется)	1200
Гарантия, мес.	24
Срок службы оборудования не менее, лет.	8



Рис. 12 . РКЭС 1

Степень готовности – оборудование готово к внедрению в массовое производство (см. рис. 12).

5. Полученные результаты

Были проведены полевые исследования влияния микроволновой обработки на рост и развитие льна-долгунца на примере трех сортов (двух среднеспелых «Е-68» и «Нива», и одного позднеспелого «Василек»), в пяти льносеющих хозяйствах Республики Беларусь. Получены следующие результаты.

1. Произошло повышение полевой всхожести за счет активации метаболических процессов у семян льна-долгунца, обработанных перед посевом микроволнами (табл. 5).

Таблица 5

Влияние микроволновой обработки на полевую всхожесть

Вариант опыта	Полевая всхожесть, %			
	«Поставы»	«Березино»	«Пуховичи»	«Слуцк»
3-й режим	76	–	–	–
2-й режим	74	60	83	75
Контроль	66	54	66	72
Протравитель	63	47	65	66

Примечание. «Ляховичи»: протравитель + микроволны – 72 %;
протравитель – 66 %.

2. В процессе вегетации отмечено наличие у варианта с микроволновой обработкой более мощной корневой системы и сокращение сроков прохождения фаз развития за счет лучшего обеспечения пластическими материалами, необходимых для растения.

3. Важным результатом эксперимента можно считать, что на обработанных участках не было отмечено наличия заболеваний.

4. Положительно сказалась микроволновая обработка на росте растений. Произошла активация микроволнами ферментов и уридифосфатглюкозы, которые участвуют в образовании волокон льна, в результате чего в варианте с микроволнами растения были выше, чем в других вариантах (табл. 6).

Таблица 6

Общая высота растений на экспериментальных участках

Вариант опыта	Общая высота растений, см				
	«Поставы»	«Березино»	«Пуховичи»	«Слуцк»	«Ляховичи»
3-й режим	82.8	–	–	–	–
2-й режим	78.0	98.9	90.4	97.8	–
Контроль	73.7	95.8	85.7	94.6	–
Протравитель	71.7	87.1	84.7	80.5	78.8
2-й режим + протравитель	–	–	–	–	90.9

Интенсивный рост всегда коррелирует с большим накоплением сухих веществ. Их накопление непосредственно связано с деятельностью фотосинтетического аппарата растения. Соответственно вариант с микроволнами имеет более высокую фотосинтетическую интенсивность, что отчетливо видно из табл. 7.

Таблица 7

Содержание сухого вещества фаза «елочка» (интенсивный рост)

Вариант опыта	Содержание сухого вещества, %
Режим	47
Протравитель	26
Контроль	20

5. Было установлено, что растения льна-долгунца, семена которых были обработаны перед посевом микроволнами, имели также большую ассимилирующую поверхность по сравнению с другими вариантами опытов и содержали больше хлорофилла. За счет этого увеличился экспорт ассимилянтов из листьев в стебель, что проявилось в более насыщенной окраске и способствовало формированию более сильного и мощного растения.

6. Необходимо отметить такой важный фактор, как сохранность растений к уборке, в этом случае также отмечено положительное влияние микроволновой обработки (табл. 8).

Сохранность растений на момент уборки

Вариант опыта	Количество растений к уборке, шт.				
	«Поставы»	«Березино»	«Пуховичи»	«Слуцк»	«Ляховичи»
3-й режим	1572	–	–	–	–
2-й режим	1568	912	1016	960	–
Контроль	892	856	776	792	–
Протравитель	1024	876	728	888	784
2-й режим + протравитель	–	–	–	–	896

7. Сохранность растений повлияла на продолжительность фотопериода, посеы оказались более густыми в тех вариантах опыта, где семена были обработаны микроволнами, и как следствие, растения более тонкие и вытянутые, а из длинных стеблей в процессе первичной обработки получают, как правило, длинное волокно. Все эти факторы помогают решить главную задачу льноводов, которая состоит в том, чтобы вырастить высокий, в меру тонкий и выровненный стеблестой.

8. Итогом всего растениеводческого производства является урожай и его качество.

а) Значительные результаты получены по урожайности семян на участках, обработанных микроволнами. В варианте с микроволнами прибавка по отношению к контролю на различных участках составила от 7 до 26 %, а по отношению к традиционной обработке протравителем от 13 до 44 % (табл. 9).

Таблица 9

Урожайность семян льна-долгунца, полученная при проведении полевых экспериментов

Вариант опыта	Урожайность семян, ц/га				
	«Поставы»	«Березино»	«Пуховичи»	«Слуцк»	«Ляховичи»
3-й режим	7.3	–	–	–	–
2-й режим	8.3	10.4	10.0	12.0	–
Контроль	6.4	7.7	7.8	11.2	–
Протравитель	5.6	5.8	5.8	7.9	4.6
2-й режим + протравитель	–	–	–	–	5.3

б) Влияние микроволн на качество урожая выразилось в качественном воздействии на ультраструктуру волокон, которое заключалось в увеличении наличия полисахаридов клеточной стенки и за счет этого увеличилось число лубяных пучков на отдельных экспериментальных участках (табл. 10).

Выход луба

Вариант опыта	Выход луба, %				
	«Поставы»	«Березино»	«Пуховичи»	«Слуцк»	«Ляховичи»
3-й режим	31	–	–	–	–
2-й режим	29	32	19	27	–
Контроль	28	34	12	28	–
Протравитель	30	31	15	26	28
2-й режим + протравитель	–	–	–	–	25

Номер льнотресты определяется в лабораториях льнозаводов по общепринятой методике. Результаты исследований приведены в табл. 11.

Таблица 11

Результаты определения номера льнотресты

Вариант опыта	Номер льнотресты				
	«Поставы»	«Березино»	«Пуховичи»	«Слуцк»	«Ляховичи»
3-й режим	0.50	–	–	–	–
2-й режим	0.50	1.25	1.0	1.50	–
Контроль	0.50	1.25	0.50	0.50	–
Протравитель	0.50	1.25	0.75	0.75	0.75
2-й режим + протравитель	–	–	–	–	1.00

Полученные данные дают основание сделать вывод, что необходимо постепенно отходить от традиционной и экологически небезопасной предпосевной обработки с использованием протравителя и широко применять обработку микроволнами, дающую положительные результаты по различным аспектам.

6. Оборудование для стерилизации почвенных субстратов с помощью электромагнитной энергии

Назначение: обеззараживание грунтов электромагнитным полем сверхвысокой частоты (СВЧ) (см. рис. 13).

Рекомендуемая область применения: стерилизация грунтов (уничтожение вредных насекомых, бактериальных и грибных патогенов, семян сорняков).

Преимущества перед известными аналогами: более высокий бактерицидный эффект, экологическая чистота, энергосбережение, отказ от пропаривания и применения хлорсодержащих препаратов.



Рис. 13. Оборудование для стерилизации почвенных субстратов полем сверхвысокой частоты

Результаты испытаний: результаты испытаний приведены в таблицах «Показатели эффективности микроволновой стерилизации».

Технико-экономический эффект: сравнение различных способов обработки грунтов показывает, что наименьшие удельные затраты энергии имеют место при СВЧ-обработке – $< 20 \text{ кВт ч/м}^3$, при обработке электрическим током $> 40 \text{ кВт ч/м}^3$, при обработке паром $> 70 \text{ кВт ч/м}^3$. Чем выше начальная влажность грунта, тем больше это преимущество.

Сведения об изобретении: установка обладает патентоспособностью (возможность патентования на территории России и других стран).

Обоснование применения электромагнитной энергии СВЧ:

Болезни растений могут быть вызваны вредными насекомыми, различными бактериями, вирусами и грибами, которые содержит почва. Грибы и бактерии вызывают гнилостные заболевания, а вирусы – мозаичный рисунок на листьях. Стерилизация почвы помогает избавиться от большей части почвообитающих организмов.

Основные болезни растений, которые могут вызываться патогенами, содержащимися в грунте:

Бурая пятнистость листьев, кладоспориоз. Возбудитель заболевания – гриб *Cladosporium fulvum* Cooke. Заболевание относится к числу распространенных и вредоносных в защищенном грунте. Кладоспориоз встречается в основном на листьях, но при эпифитотийном проявлении болезни признаки ее можно обнаружить на черешках, плодоножках, завязи. Первые признаки поражения проявляются на нижней стороне нижних листьев в виде светло-зеленых, а затем темно-бурых пятен с одинаковым налетом гриба. Позже на верхней стороне листьев образуются светло-зеленые, впоследствии желтеющие, буряющие пятна округлой или неправильной формы. Источниками первичной инфекции являют-

ся зараженные растительные остатки, а также споры гриба в почве, на оконных стеклах и поверхности культивационных сооружений. Семенами гриб не передается.

Стеблевая гниль. Это заболевание впервые было отмечено в 1990 г. Возбудитель – гриб *Didymilla lycopersici*. Болезнь проявляется в виде увядания, очень вредоносна. В нижней части стебля образуются бурые и черные пятна с мелкими пикнидами. На листьях иногда видны некротические пятна, окруженные желтым ободком. Темные углубляющиеся пятна появляются на плодах. Паразит зимует на пораженных и отмирающих остатках растений в виде аскоспор в почве, которые являются источником первичной инфекции.

Серая гниль. Возбудитель – гриб *Botrytis cinerea* Pers. Заболевание сильно поражает плоды и междоузлия стебля, особенно в пленочных теплицах, если в это время стоит прохладная, пасмурная погода. На зеленых или созревающих плодах появляются светло-зеленые, сначала мелкие, затем увеличивающиеся пятна, в центре их выделяются бурые точки. На этой стадии пятна выглядят водянистыми, впоследствии ткань загнивает. Зимует возбудитель серой гнили в виде склероций, в тепличном грунте образует конидии – на внутренней поверхности стекол.

Бактериальный рак. Возбудитель – бактерия *Corynebacterium michiganense* jensen. На черешках и стеблях больных растений появляются бурые полосы при продольном срезе. На плодах пятна мелкие, желтоватые или почти белые с центром. Пораженные плоды часто бывают неправильной формы, мякоть в отдельных местах бурая, плоды опадают.

Аскохитоз. Возбудитель – гриб *Ascochyta melonis* Pot. cucumis Fautr. et Roum. Поражает чаще всего листья и стебли. Листья покрываются крупными округлыми, ярко-желтыми или светлыми хлоротичными пятнами. На стеблях и междоузлиях места поражения становятся сухими, серыми и ткань покрывается множеством черных точек спороношения гриба. Одним из источников инфекции аскохитоза являются зараженные растительные остатки в почве.

Фузариоз. Поражение растений этой болезнью происходит в различные фазы роста и развития, начиная с фазы всходов, иногда даже проростков. Большинство высаженных на постоянное место растений, пораженных корневой гнилью, внешне до цветения почти не отличаются от здоровых. Со времени вступления в фазу плодоношения начинается их увядание. Первый признак заболевания взрослых растений – поникание верхушек в яркие полуденные часы. Главный корень больных растений постепенно буреет или полностью отмирает. Боковые корешки также частично или полностью отмирают. Основным источником заражения огурца фузариозом – почва, куда гриб попадает с растительными остатками. Возбудитель передается семенами.

Белая гниль. Возбудитель – гриб *Sclerotinia cinerea* Pers. Vu. Болезнь может развиваться на всех частях растений – корнях, стеблях, черешках, листьях и плодах. При поражении наземных органов ткань становится мягкой, слегка ослизняется, покрывается плотной грибницей, в которой впоследствии образуются черные склероции. Растения увядают, листья теряют тургор, засыхают. Возбудитель белой гнили передается по воздуху, а также переносится механически (на руках и инструментах). Заражение происходит почти всегда через ранки.

Мучнистая роса. На листьях образуется белый или сероватый налет, сначала в виде отдельных пятен, а затем вся пораженная поверхность покрывается налетом. Листья буреют и засыхают. Возбудители мучнистой росы зимуют в виде сумчатой стадии на остатках пораженных растений в почве.

7. Основные вредители овощных культур

Обыкновенный паутинный клещ. Это многоядный вредитель, особенно вредоносен для культуры огурца. Самка клеща широкоовальной формы, длиной 0.4–0.5 мм. Самка летних поколений – серовато-зеленого цвета с темными пятнами по бокам, зимующие самки оранжево-красные. Самцы более удлинённые, несколько меньше самок. Взрослые особи имеют четыре пары ног. Яйца мелкие, шаровидной формы, зеленовато-желтые, полупрозрачные. Личинки полушаровидной формы, длиной 0.12–0.13 мм, с тремя парами ног. Самка откладывает яйца вразброс на нижней стороне листа. Одна самка в течение периода жизни (2–3 недели) способна отложить до 150 яиц и более. В течение года паутинный клещ способен давать до 20 поколений. Первым внешним признаком повреждения является появление отдельных светлых пятен. При продолжительном питании вредителя пятна постепенно сливаются, листья желтеют и отмирают. Зимуют оплодотворенные самки в щелях теплиц под комочками почвы, сухими остатками растений, в пчелиных семьях.

Тепличная белокрылка. Относится к семейству Алейродид, отряда Равнокрылых хоботных насекомых. Взрослые насекомые имеют бледно-желтое тело длиной 1.5 мм с двумя парами мучнисто-белых крыльев. Самка несколько крупнее самца. Самка откладывает яйца, прикрепляя их к листу при помощи стебелька (ножки). На опушенных листьях яйца располагаются поодиночке, на гладких – группами, часто в виде кольца. Яйца продолговатой формы, сначала белые, затем приобретают темно-коричневый цвет, почти черный. Продолжительность развития яйца зависит от температуры и колеблется от 4 до 7 дней. Существует 4 личиночные стадии. Продолжительность развития белокрылки составляет 28–30 дней, плодовитость – в среднем 240 яиц. За период вегетации растений в теплице белокрылка развивается в 6–8 поколениях.

Табачный трипс. Широко распространенный вид полифага, чаще всего повреждает огурец. У трипса светло-желтая или коричневая окраска, тонкое удлиненное тело, узкие крылья с бахромой из волосков. Крылья и передние ноги желтоватого цвета. Одна самка вредителя откладывает до 100 яиц в ткани листьев растений, по 3–4 яйца в день. Развитие яйца длится 6–7 дней. Развитие личинок проходит на листьях, нимф – в почве. Развитие трипса от яйца до имаго проходит за 20–25 дней. За вегетационный период вредитель дает 6–8 поколений. В местах укусов от личинок и имаго трипсов на листьях образуются светло-желтые пятна угловатой формы. При сильном повреждении весь лист имеет беловато-желтые крапинки с черными точками – экскрементами трипсов. Листья становятся бурыми и засыхают. Для развития трипса оптимальная температура воздуха – 25–30 °С. В теплицах вредитель сохраняется на проростках сорняков.

Огуречный комарик. Взрослые комарики – мелкие, темно-серые, двукрылые насекомые, реже бескрылые (самки). Голова маленькая, полушаровидная, опущенная вниз. Яйца откладывают в почву или в трещины стебля огурца кучками по 20–80 штук. Яйца белые, овальные, блестящие. Продолжительность фазы яиц 5–10 дней. Развитие личинок длится 8 дней. Личинки беловатые, полупрозрачные, с просвечивающимся темным кишечником и с черной головой. Продолжительность личиночной фазы – 8–12 дней. Окукливаются личинки в почве, длительность фазы куколки – 7–8 дней. Весь цикл развивается при температуре 18–20 °С, длится 24–30 дней, в теплицах комарики могут давать до 8 поколений в год. Вредят личинки комариков, внедряясь в корень. Они проделывают ходы в корнях и разрушают их. Признаки повреждения растений обнаруживаются не сразу. Повреждения заметны в фазу цветения и плодоношения. Растения теряют тургор, увядают и гибнут.

Пасленовая минирующая муха. Минирующая муха в теплице повреждает в основном помидоры, но часто наносит вред рассаде капусты и листьям огурца. Развитие трипса от яйца до имаго проходит за 20–25 дней. За вегетационный период вредитель дает 6–8 поколений. В местах укулов от личинок и имаго трипсов на листьях образуются светло-желтые пятна несколько угловатой формы. При сильном повреждении весь лист имеет беловато-желтые крапинки с черными точками – экскрементами трипсов. Листья становятся бурыми и засыхают. Для развития трипса оптимальная температура воздуха – 25–30 °С. В теплицах вредитель сохраняется на проростках сорняков.

Нематоды. Большую угрозу для огурца и томата представляют нематоды. Чаще встречаемыми видами галловых нематод являются: южная, песчаная и северная.

Южная галловая нематода распространена главным образом в защищенном грунте, опасный паразит огурца и томата. Нематода проникает в растение в точке роста корня. Поселяется в тканях корней, где, выделяя токсические вещества, вызывает образование галлообразных вздутий. Внутри галлов, где были отложены яйца, происходит развитие личинок. Личинки живут во вздутии корней или выходят в почву и переходят на другие растения. Растение, поврежденное галловой нематодой, отстает в росте и значительно снижает урожай. Галлообразование на корнях затрудняет водоснабжение и нарушает нормальное питание растений, поэтому вред от нематод особенно велик в жаркую погоду. На одном растении может быть до несколько сот галлов. Галлы бывают величиной от булавочной головки до 3–5 мм в диаметре. Галловая нематода теплолюбива. Развивается при температуре 25 °С в течение 21 дня, а при 17 °С – 40 дней. Для уничтожения в тепличном грунте вредных насекомых, микроорганизмов и семян сорняков применяют обычно обработки ядохимикатами или паром. Главный недостаток химического способа – в опасности накопления в грунте ядовитых веществ, термического – в большой трудоемкости (например, при «шатровом» способе обработки паром требуется 10 чел.-дн. на каждую тыс. кв. м). Сложность борьбы с вредоносными и распространенными вредителями и болезнями овощных культур заключается в видовом многообразии вредителей, исключительно высоких темпах размножения, высокой плодовитости. Многие

вредители, закончив питание (особенно трипсы) переселяются в почву, где превращаются в пронимфу и нимфу.

Разработанная нами технология основывается на стерилизующем эффекте СВЧ электромагнитных колебаний. Эффект заключается в избирательном нагреве патогенных микроорганизмов, являющихся влажными диэлектриками. Возбудители болезней при СВЧ воздействии погибают вследствие высокой скорости нарастания их температуры. За 1 секунду температура микроорганизма повышается на 5–7 градусов (при этом нагрев идет внутри организма). Регулируя время воздействия и интенсивность электромагнитного излучения, получили полную стерилизацию почвы или почвенных субстратов.

Основные технические характеристики оборудования для стерилизации грунта

1. Производительность, т/сут.....1–2
2. Потребляемая мощность, кВтч.....8–9
3. Количество микроволновых модулей, шт.....6
4. Рабочая частота источника э/м энергии, МГц.....2450 ± 100
5. Вес, кг.....1800

Результаты производственных испытаний оборудования для микроволновой стерилизации грунта (см. рис. 13) – положительные. Процент ингибирования возбудителей болезней растений составил 100 %. Жизнеспособных галловых нематод в различных стадиях развития после обработки почвы не обнаружено. Это дает основание утверждать о высокой эффективности метода микроволновой стерилизации почвы (см. табл. 12 – 17).

Показатели эффективности микроволновой стерилизации

Таблица 12

Возбудители	Интенсивность спороношения до обработки, %	Интенсивность спороношения после обработки, %	Ингибирование возбудителей, %
<i>Fusarium oxysporum</i> (корневая гниль)	92.8	0	100 %
<i>Botritis cinera</i> (серая гниль)	94.9	0	100 %
<i>Sclerotinia sclerotinian</i> (белая гниль)	85.4	0	100 %
<i>Corynebacterium michiganense</i> (бактериальный рак)	76.3	2.1	97.1 %

Таблица 13

Стадии развития	Количество жизнеспособных нематод в 0.1 мл почвенной вытяжки до обработки	Количество жизнеспособных нематод в 0.1 мл почвенной вытяжки после обработки
Личинка	6.2	0
Самки	7.0	0
Самцы	7.2	0

Таблица 14

Возбудители до обработки	Возбудители после обработки
Споры <i>Ascochyta cucumeris</i> – 17–18 шт.	Обрывки мицелия
Споры сапрофитных грибов – массовое количество	Обрывки мицелия
Споры <i>Colletotrichum</i> – массовое количество	Обрывки мицелия
Споры <i>Botrytis cinerea</i> – массовое количество	Обрывки мицелия

Таблица 15

Возбудители	Наличие жизнеспособных колоний патогена
<i>Colletotrichum</i>	0
<i>Aspergillus</i> , <i>Ascochyta</i> , <i>Penicillium</i>	0
<i>Mucor</i>	единичные
<i>Fusarium</i>	0

Таблица 16

Возбудитель	Наличие колоний после облучения живых	Наличие колоний после облучения погибших	Ингибирование возбудителей, %
<i>Ascochyta</i>	0	10	100
<i>Colletotrichum</i>	0	20	100
<i>Fusarium</i>	0	0	–
<i>Botrytis</i>	0	16	100
<i>Aspergillus</i>	0	22	100
<i>Mucor</i>	0	40	100



Рис. 14. Оборудование для микроволновой стерилизации пищевых добавок

8. Оборудование для микроволновой стерилизации пищевых добавок

Оборудование предназначено для высокоэффективной энергосберегающей технологии стерилизации продуктов, а также материалов для различных отраслей промышленности и сельского хозяйства на конвейере, в основе которой лежит высокое поглощение микроволновой энергии диэлектрическими материалами и отсутствие промежуточных носителей. На рис. 14 приведена фотография оборудования для стерилизации пищевых добавок из шрота расторопши «Здравушка».

Таблица 17

Результаты исследования режимов микроволновой стерилизации препаратов расторопши «Здравушка» по микробиологическим показателям

Показатели	Нормативы	Режимы стерилизации					
		1	2	3	4	5	К
1.КМАФАн М/кое/г/	Не более 1×10^4 Недоп. в 0.1 г	2.8×10^2 БГКП	1.3×10^2	6×10^2	3.2×10^2	Из-бы-точная мощность	8×10^5 БГКП
2. БГКП	Недоп. в 1 г	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.	точ-ная мощ-ность	Не обн.
3. E. coli	Недоп. в 1 г	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.		Не обн.
4. St. aureus	Не более 200	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.		Не обн.
5. V. cereus	Недоп. в 10 г	Не обн.	Не обн.	Не обн.	Не обн.		Не обн.
6. Патогенные в т. ч. сальмонелла	Не более 100		Не обн.	Не обн.	Не обн.		Не обн.
7. Дрожжи /кое/г/	Не более 100	$1,2 \times 10^4$					
8. Плесени /кое/г/			Не обн.	Не обн.	Не обн.		6×10^4

Технические характеристики оборудования

1. Оборудование выполняет микроволновую стерилизацию препаратов расторопши «Здравушка» в виде шрота, таблеток и капсул.
2. Производительность.....1–2 т/сутки.
3. Рабочая частота источника эм энергии, МГц.... 2450 ± 100 .
4. Питание оборудования – трехфазная сеть переменного тока напряжением 380 В, частотой 50 Гц.
5. Потребляемая мощность.....8 кВтч.
6. Габариты..... $4 \times 2.5 \times 1.5$ м.
7. Вес.....1300 кг.
8. Загрузка/выгрузка препаратов, фасованных в любую (не металлическую тару)ручная.
9. Гарантия.....12 мес.
10. Срок службы оборудования.....8 лет.

Оборудование должно располагаться в помещении, защищенном от попадания атмосферных осадков, предназначено для эксплуатации в условиях умеренного климата исполнения УЗ.1 по ГОСТ 15150-69.

9. Заключение

Предложены новые принципы широкополосного согласования высокодобротных резонансных систем с одномодовыми волноводами при помощи плавных волноводных переходов, обеспечивающих $KCB < 1.88$ и нагруженную добротность > 40000 волноводами в диапазоне частот 53–178 ГГц.

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование новых принципов широкополосного согласования высокодобротных широкодиапазонных резонаторов с одномодовыми волноводами при помощи плоских щелевых решеток.

В результате спроектированы новые устройства связи, которые обеспечили $KCB < 1.6$ во всем диапазоне перестройки резонатора.

Данные устройства связи альтернативны бездиафрагменным устройствам связи, т. к. в миллиметровом диапазоне частот сужающиеся волноводы обычно изготавливают методом гальванического наращивания, что требует изготовления сверхточных оправок и является дорогостоящим технологическим процессом. Новые решетчатые устройства связи выполнены средствами микроэлектроники в виде интегральной схемы, что обусловило их высокую надежность и повторяемость результатов. Существенно, что они не требуют подгонки величины связи как в процессе производства, так и в процессе эксплуатации резонатора (при его частотной перестройке).

Особо следует отметить, что применение новых устройств связи в резонаторах практически не ухудшило нагруженную добротность резонатора.

Разработано стендовое оборудование и методики измерения электродинамических параметров нанокompозитных материалов.

Выполнен анализ электромагнитных задач для составных материалов. Разработана электродинамическая модель теплового взаимодействия СВЧ энергии с различными диэлектрическими материалами. Разработана математическая модель электродинамических и энергетических процессов функционирования микроволнового теплового модуля с рупорной конструкцией возбуждения и учетом диэлектрической нагрузки.

Сформулирована математическая постановка задачи для самосогласованной системы уравнений Максвелла и уравнения теплопроводности, связанных через комплексную диэлектрическую проницаемость нагреваемого материала.

Получены распределения возбуждаемых электромагнитных полей в объеме камеры и в диэлектрическом заполнении, а также характерные зависимости от σ и ε_r коэффициента поглощения диэлектриком, которые подаются в СВЧ-камеру через рупор.

Расположение открытых технологических окон конвейерной камеры СВЧ-нагрева выбраны таким образом, чтобы обеспечить защиту от паразитного излучения. Во всех разработанных образцах технологического оборудования для сушки и стерилизации различных диэлектрических материалов обеспечена равномерность нагрева.

Модульный принцип построения технологического оборудования позволил выполнять различные хозяйственные проекты по стерилизации, нагреву и сушке диэлектрических материалов в кратчайшие сроки.

Разработано высокоэффективное оборудование для микроволновой стерилизации почвы, сушки и стерилизации пищевых и биологически активных добавок. Разработано промышленное оборудование для биофизической микроволновой предпосевной обработки семян льна.

Литература

1. *Faby G., Schiinemann K.* // IEEE Trans. on MTT. 1997. Vol. 45. P. 2043.
2. *Matsui T., Akari K., Kijokawa M.* // IEEE Trans. on microwave theory and techniques. 2000. Vol. 48. P. 1043.
3. *Булгаков Б. М., Гламаздин В. В., Натаров М. П., Скресанов В. Н.* // РЭ. 1998. Т. 3. С. 46.
4. *Леонов Ю. И., Фурсов А. М.* // Радиотехника. 1986. Вып. 59. С. 22.
5. *Балаклицкий И. М., Ревин И. Д.* и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1983. Т. 26. С. 235.
6. *Kuraev A. A., Natarov M. P., Rodionova V. N.* et al. // Int. J. Electronics. 1991. Vol. 70. P. 1005.
7. *Родионова В. Н., Слепян Г. Я.* // РЭ. 1989. Т. 34. С. 1357.
8. *Rodionova V. N., Slepyan A. Ya., Slepyan G. Ya.* // Electronics Letters. 1991. Vol. 27. P. 1427.
9. *Кисунько Г. В.* Электроника помех систем. 1949.
10. *Вайнштейн Л. А.* Теория дифракции и факторизации. 1966.
11. *Родионова В. Н., Слепян Г. Я.* // РЭ. 1986. Т. 31. С. 1915.
12. *Конторович М. И., Астрахан М. И.* и др. Электродинамика сетчатых структур. 1987.
13. *Нефедов Е. И., Сивов А. Н.* Электродинамика периодических структур. 1977.
14. *Альтман Д.* Устройства сверхвысоких частот. 1969.
15. *Ilyinsky A. S., Kuraev A. A.* et al. // Proc. of the URSI Int. Symposium of electromagnetic theory. Stockholm. 1989. P. 64.
16. *Родионова В. Н., Слепян Г. Я.* // ЖТФ. 1989. Т. 59. С. 7.
17. *Ilyinsky A. S., Slepyan G. Ya., Slepyan A. Ya.* Propagation, scattering and dissipation of electromagnetic waves. 1993.
18. *Шестопалов В. П., Кириленко А. А., Масалов С. А.* Матричные уравнения типа свертки в теории дифракции. 1984.
19. *Свешников А. Г., Ильинский А. С.* // Вычисл. математика и мат. физика. 1968. Т. 8. С. 363.
20. *Велиев Э. В., Веремей В. В., Шестопалов В. П.* // РЭ. 1988. Т. 33. С. 478.
21. *Левин М. Л.* // Техническая физика. 1948. Т. 18. С. 653.
22. *Lyarin V. P., Michalevsky V. S., Sinyavsky G. P.* // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1982. Vol. 30. P. 1107.
23. *Альтман Д.* Устройства сверхвысоких частот. 1969.
24. *Altman Dj.* Microwave devices. 1970.
25. *Ilyinsky A. S., Slepyan G. Ya., Slepyan A. Ya.* Propagation, scattering and dissipation of electromagnetic waves. 1993.
26. *Karpovich V. A., Rodionova V. N., Slepyan G. Ya.* // Electromagnetics. № 11, 2004.
27. *Раков Э. Г., Блинов С. Н.* и др. // Ж. прикл. химии, 2004. Т. 77. С. 193.
28. *Раков Э. Г., Гришин Д. А.* и др. // Ж. физ. химии. 2004. Т. 78. № 12. С. 2204.
29. *Золотухин И. В., Голев И. М.* и др. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. С. 54.
30. *Карпович В. А., Родионова В. Н., Притула И. В.* Патент РФ №5107 от 30.03.99, F 26B 3/347. Микроволновое устройство. Выд. 23.12.2002.
31. *Карпович В. А., Родионова В. Н., Притула И. В.* Патент РФ №5274 от 30.03.1999, F 26B 3/347. Устройство для СВЧ нагрева. Выд. 03.03.2003.
32. *Rodionova V. N., Karpovich V. A., Slepyan G. Ya.* // The Fourth Int. Kharkov Symposium "Physics and engineering of millimeter and sub-millimeter waves". 2001. P. 909.

33. *Karpovich V. A., Rodionova V. N., Slepyan G. Ya.* // Telecommunications and Radio Engineering. 2002. Vol. 57(2–3). P. 168.
34. *Rodionova V., Karpovich V.* et al. // V Inter. Symposium on physics and engineering of microwave, millimetre and submillimeter waves. Kharkov. 2004. P. 601.
35. *Ермолович А. А., Карпович В. А.* и др. // Миллиметровые волны в биологии и медицине. 2004. №1. С. 68.
36. *Ермолович А. А., Карпович В. А.* и др. // Гавриш. 2004. № 3. С. 36.
37. *Карпович В. А., Ермолович А. А.* и др. // Агропанорама. 2004. № 4. С.17.
38. *Vas'ko P., Ermolovich A.* et al. // V Inter. Symposium on physics and engineering of microwave, millimetre and submillimeter waves. Kharkov. 2004. P. 832.
39. *Ermolovich A., Karpovich V.* et al. // V Inter. Symposium on physics and engineering of microwave, millimetre and submillimeter waves. Kharkov. 2004. P. 874.
40. *Карпович В., Ермолович А.* // Радиомир. 2004. № 9. С. 21.
41. *Карпович В., Сидоров Е.* // Радиомир. 2004. № 11. С. 19.
42. *Karpovich V. A.* // Доклад на днях науки Республики Беларусь, Китай, Чанг-Чунь, июнь 2005 г.
43. *Карпович В. А., Ермолович А. А.* // 2 Международная конференция «Состояние и проблемы научного обеспечения овощеводства защищенного грунта». 2005. Москва.
44. *Карпович В. А., Родионова В. Н.* Патент РБ № 5580. Способ предпосевной обработки семян овощных или зерновых культур. Выд. 23.06.2003.

ELECTRODYNAMICS OF SPECIAL HIGH-QUALITY RESONANCE SYSTEMS AND MICROWAVE TECHNOLOGIES

**V. A. Karpovich, G. Ya. Slepyan, V. N. Rodionova, G. I. Volinets,
A. A. Savuk, O. V. Tanana, I. A. Grinchuk**

Resonance systems are widely spread in modern radiotechniques for frequent filtration of electromagnetic oscillations, realization of feedback by its strengthening and generation. Resonance effect and resonance systems are widely spread when measuring material environment's characteristics, for creation of different industrial plants and equipment, which is based on principle of savings electromagnetic energy in resonance volume.

The most relevant problems, arising during theoretical and practical investigating principles of creation of resonance systems in VHF-range are the development of calculation methods of broadband elements of connection of resonance systems with single-mode waveguides and technical supplement of received results for development of plants for measuring of electro-dynamics characteristics of composite materials in VHF-range and also high-quality equipment for microwave heating, sterilization, drying of different dielectric materials.