

05; 09

© 1991

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ПОГЛОТИТЕЛЬ  
МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ  
„HORDEUM VULGARE“

А.А. Раваев, А.О. Кожевников

Поглотители электромагнитных волн [1, 2] широко применяются в экспериментальной физике и технике СВЧ. Разнообразие предъявляемых к ним требований предполагает поиск новых материалов ПЭВ [3-6]. Одновременно в приборах релятивистской СВЧ электроники и крупногабаритных безэховых камерах находят применение и традиционные материалы, например [7] на основе карбида кремния  $n$ -типа, карборунда, - обычного абразивного инструмента. Ниже рассмотрен другой широкополосный ПЭВ растительного происхождения „*Hordeum Vulgare*“, также обладающий высокими эксплуатационными параметрами, технологичностью и низкой стоимостью. Наряду с утилитарным определенным физический интерес представляют подход к расчету его эффективной диэлектрической проницаемости  $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$ , а также обнаруженные особенности поведения  $HV$  в импульсных СВЧ полях  $E \approx 10^6$  В·м<sup>-1</sup>. Конструкция  $HV$  весьма проста - слой зерна между двумя диэлектрическими пластинами; толщина его определяется рабочим диапазоном длин волн:  $(4-5)\lambda$ . Проницаемость  $\epsilon$  рассчитывалась по формулам [8] через измеренные в 3-сантиметровом волноводном тракте энергетические коэффициенты отражения и прохождения излучения через „образец“  $\epsilon = 2.37 + i 0.20$  на частоте  $\omega = 6 \cdot 10^{10}$  с<sup>-1</sup>.

В задачах синтеза ПЭВ с диэлектрическим типом поглощения рассматривают в основном материалы с нормальной дисперсией компонентов:  $\epsilon = \epsilon' + i\sigma / \omega \epsilon_0$ , где  $\sigma$  - удельная проводимость,  $\epsilon_0$  - диэлектрическая постоянная. В [9] отмечается ряд преимуществ плоскостойных ПЭВ с дебаевской дисперсией  $\epsilon(\omega)$ . Примером такой среды является вода, которая и служит в качестве

поглощающей фазы HV: после длительной сушки в термокамере поглощающие свойства зерна заметно упали ( $\epsilon_g = 1.72 + i0.041$ ). Естественное диспергирование  $H_2O$  в материале (отдельных зернах) обеспечивает согласование ПЭВ со свободным пространством.

1. Для расчета  $\epsilon$  композиционного материала HV используем приближение эффективной среды [6, 10-12], правомерность которого подтверждается в работах [13, 14], посвященных расчетам  $\epsilon$  гидрометеоров. Материал HV - трехфазный (зерно-вода-воздух) и для расчета его эффективной проницаемости необходимо осуществить двойное приближение. Проницаемость  $\epsilon_h$  собственно зерна найдем, пользуясь простым правилом Винера [1]

$$\epsilon_d = \sigma \epsilon_h + (1 - \sigma) \epsilon_1,$$

где  $\epsilon_1 = 1$  - проницаемость воздуха;  $\sigma = 0.42$  - объемная концентрация ядрышек зерен („шелухой“ пренебрегаем, иначе расчеты приведут к физически неверному результату). Отсюда находим  $\epsilon_h = 2.71 + i0.10$ . Диэлектрическую проницаемость воды рассчитаем по формулам дебаевской дисперсионной модели [13, 15]:

$$\epsilon'_W = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_c - \epsilon_\infty}{1 + (\omega\tau_D)^2}, \quad \epsilon''_W = \omega\tau \frac{\epsilon_c - \epsilon_\infty}{1 + (\omega\tau_D)^2} + \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}; \quad (1)$$

$$\epsilon_c = 87.74 - 0.4008T + 9.398 \cdot 10^{-4} T^2 - 1.41 \cdot 10^{-6} T^3,$$

$$\epsilon_\infty = 5 + 0.02T.$$

Удельная проводимость грунтовых вод  $\sigma = 10^{-2} - 10^{-3}$  см/м [15] и последним слагаемым  $\epsilon''_W$  в СВЧ диапазоне можно пренебречь. При  $T = 20$  °C и времени релаксации  $\tau_D = 9.22 \cdot 10^{-12}$  с получаем  $\epsilon_W \approx 61.3 + i32.4$ .

Определенная взвешиванием (после обезвоживания) концентрация  $H_2O$  в зерне  $\sigma_W = 0.15$ . Аналогично находим проницаемость свежего зерна (равномерного, что важно, „раствора воды“ в органической субстанции)

$$\epsilon_2 = \sigma_W \epsilon_W + (1 - \sigma_W) \epsilon_h \approx 11.1 + i4.93.$$

Второе приближение - окончательный расчет эффективной проницаемости HV, как „искусственного диэлектрика“ [10-12]. Выбор расчетной формулы в данном случае представляет самостоятельный интерес. Помимо правила Винера находят применение логарифмический закон Лихтнекера:

$$\ln \epsilon = \sigma \ln \epsilon_2 + (1 - \sigma) \ln \epsilon_1, \quad \text{или} \quad \epsilon = \epsilon_2^\sigma \quad (2)$$

и уравнение Максвелла-Гарнета (оно же Клаузиуса-Моссотти, Лоренц-Лорентца [11]), которое для сферических частиц в электродинамике записывается в виде [10]:

$$\varepsilon = \frac{1+2\sigma L}{1-\sigma L}, \quad L = \frac{\varepsilon_p - 1}{\varepsilon_p + 2}, \quad \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_2} = \frac{2(\sin\theta - \theta \cos\theta)}{(\theta^2 - 1)\sin\theta + \theta \cos\theta}. \quad (3)$$

При радиусе ядра зерна  $r = 1.5-2$  мкм  $|\theta| = 2\pi r \sqrt{\varepsilon_2} / \lambda \approx 1.4$  и  $\varepsilon_p \approx 1.2\varepsilon_2$ . Условие применимости (3) -  $k_1 r = 2\pi r / \lambda \ll 1$ , у нас же  $k_1 r \approx 0.4$ ; но из работы [6] следует, что поправка к расчету в этом случае незначительна. Наконец, среда с эллиптическими частицами при их хаотической ориентации рассчитывается по формуле (3), если положить  $L = L^* = (1/9) \sum_i (\varepsilon_2 - 1)^{\times} \times [1 + f_i (\varepsilon_2 - 1)]^{-1}$ , где  $f_i$  - факторы деполяризации [11, 17]. Для эллипсоида вращения с учетом геометрии зерна  $f_1 \approx 0.059$ ,  $f_{2,3} \approx 0.47$ .

На рисунке приведены графики зависимостей  $\varepsilon(\sigma)$ . Для наглядности в расчетах проницаемость зерен принималась равной  $\varepsilon_2 = |\varepsilon_p| = 14.5$ . Если бы вода равномерно заполняла всю оболочку зерна, то  $\sigma \approx 0.64$  - истинная концентрация и  $|\varepsilon_2| \approx 9.37$ . Значения  $\sigma = 0.42$  и  $0.64$  отмечены на рисунке точками. Лучшее приближение к экспериментальному значению  $|\varepsilon| = 2.38$  дает уравнение Левина (3) при  $\sigma = 0.42$ . При этом совпадение кривых 2,а и 4,б, 2,б и 3,а приводит к практически интересным результатам:

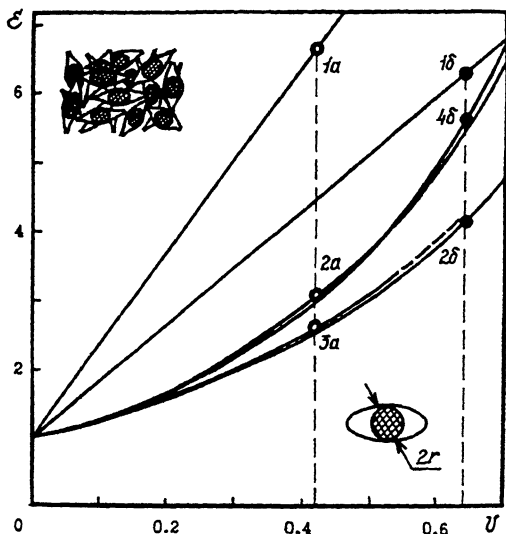
- 1) отличие формы частиц от сферической эквивалентно их замене на шарики с более высокой проницаемостью;
- 2) строгое уравнение (3) можно заменить формулой (2), если уменьшить  $\varepsilon_2$  на фиксированную величину  $\Delta$ . Действительно, приравняв (2) и (3) и осуществив двойное разложение в ряд Маклорена, получим

$$\tilde{\varepsilon}_2 = \varepsilon_2 - \Delta = (1 + 3\sigma L + 3\sigma^2 L^2 + \dots)^{1/\sigma} = 1 + 3L \left(1 + \frac{3}{2}L + \frac{3}{2}L^2\right) + o(\sigma L^2).$$

Это выражение в первом приближении не зависит от параметра  $\sigma$  (ряд сходится при поляризуемости  $|L| < 1$ ). Это же относится и к расчету материалов с магнитными потерями [4-6].

Строгий расчет по формуле (3) (или (2) с учетом поправки  $\Delta$ ) дает  $\varepsilon = 2.47 + i0.196$ . Коэффициент поглощения  $\beta = (2\pi/\lambda) \text{Im}\sqrt{\varepsilon} = 0.131 \text{ см}^{-1}$  или  $1.14 \text{ дБ/см}$ . Расчетные данные хорошо совпадают с экспериментальными. Точность расчета может быть повышена путем учета двухслойной структуры семян в эквивалентной проницаемости  $\varepsilon_p$  и введением коэффициентов  $f_i$  в поляризуемости  $L^*$  [6, 18].

2. В импульсных СВЧ полях с интенсивностью  $J \sim 10^5 \text{ Вт/см}^2$  поведение НВ обнаружило интересную особенность: при длительности СВЧ импульсов  $\tau_p = 5$  мкс с частотой повторения  $f = 10 \text{ Гц}$  коэффициент поглощения плавно (за время  $\tau_p = 30-60$  с) возрастал на  $\sim 20\%$  и далее не менялся. Инерционность процесса нельзя объяснить СВЧ нагревом зерна. В импульсном режиме изменение



Графики зависимостей  $\varepsilon(U)$ : 1 - правило Винера, 2 - закон Лихтнеккера (2), 3 - формула Левина (3), 4 - то же для эллиптических частиц; а -  $\varepsilon_2, \varepsilon_p = 14.5$ ; б -  $\varepsilon_2 = 9.37$ .

температуры  $\Delta T \approx J_q \tau^* / M c$ , где  $\tau^* = \tau_p^* \tau_0^f$  - истинное время облучения;  $M \approx 6$  мг и  $c \approx 0.8$  Дж/г К - масса и эффективная теплоемкость зернышка. Можно показать, что его эффективное сечение поглощения  $q = (8\pi/3)(r^3/\nu)\beta \approx 0.013$  см<sup>2</sup> и  $\Delta T \leq 1^\circ\text{C}$ . Более того, расчет (1) показывает, что поглощающие свойства  $\text{H}_2\text{O}$  с ростом  $T$  падают [15].

Другим возможным механизмом является диссоциация воды в СВЧ поле. Но максвелловское время релаксации даже для дистиллированной воды  $\tau_M = \varepsilon_c \varepsilon_0 / \sigma \approx 2 \cdot 10^{-4}$  с  $\ll f^{-1}$ . Зерно  $\text{NV}$ , видимо, можно отнести к подвиду лиофобных коллоидных систем - студням с ограниченной набухаемостью [19] и предположить, что ионы  $\text{H}^+$  при диссоциации накапливаются (до насыщения за время  $\tau^*$ ) вокруг электроотрицательного каркаса, образуя органический макрокластер-мицеллу (эффективная проводимость  $\varepsilon_c \varepsilon_0 / \tau_0^* \leq \leq 10^{-10}$  см/с - величина аномально малая). Механизмом же диссоциации  $\text{H}_2\text{O}$  может быть термополевая диссоциация Френкеля (приводящая к возникновению разрядов в воде в наносекундных квазистационарных полях  $10^8 - 10^9$  В/м [20, 21]. Время нарастания концентрации  $\text{H}^+$  до величины  $\rho$ :  $\tau_d = \rho / K(\varepsilon) \cdot N$ , где  $K(\varepsilon) = \nu \exp \{ [2(e^3 E / \varepsilon_c \varepsilon_0)^{1/2} - U] / kT \}$ ,  $N = 3 \cdot 10^{28}$  м<sup>-3</sup>,  $\nu \approx 1.4 \cdot 10^5$  с<sup>-1</sup>, энергия активации процесса  $U = 0.58$  эВ [20]. Концентрация  $\rho$  находится из соотношения  $\sigma \approx 2 e \mu^+ \rho$ ,  $\mu^+ = = 3.62 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/В·с - подвижность ионов  $\text{H}^+$  при комнатной температуре [19]. Изменение коэффициента поглощения  $\Delta \beta / \beta = 0.2$

соответствует появлению в уравнениях (1) проводимости  $\sigma \approx 5 \text{ см/л}$  и при  $E=10^6 \text{ В/м}$   $\tau_d \approx 20 \text{ с} \gg \tau^*$ . Эти оценки справедливы для квазистационарных полей.

В СВЧ поле вблизи дебаевского резонанса  $\omega \sim \tau_d^{-1}$  из-за раскачки колебаний возможно понижение эффективной энергии активации  $V^*(\omega)$ . Величина  $\tau_d \sim \tau^* \approx 10^{-3} \text{ с}$  соответствует  $V^* \approx 0.32 \text{ эВ}$ , что вполне вероятно. На уменьшении  $V^*$  и в итоге  $\tau_d$  может сказаться и наличие  $\xi$ -потенциала двойного слоя мицеллы [19]. В физически сложной биосистеме, какой является зерно  $NV$ , возможны отличия и других коэффициентов.

Таким образом, термополевая диссоциация позволяет качественно объяснить инерционный процесс изменения свойств  $NV$  в сильных СВЧ полях, а сам материал является не только простым и эффективным поглотителем электромагнитных волн, но и интересным физическим объектом.

В экстремальных условиях эксплуатации „*Hordeum Vulgare*“ или „ячмень обыкновенный“ можно использовать и по прямому назначению... Сохранность зерна в СВЧ поле гарантирована [22]. Более того, „информационное“ СВЧ воздействие (без прямого нагрева семян) привело к возрастанию - при контрольном посеве - энергии прорастания и всхожести ячменя на 3-4%. Авторы благодарят за помощь в работе - П.А. Самарского, за проверку семян на всхожесть - Л.Б. Губину и за предоставленный для исследований „материал“ - Г.М. Третьяка, директора колхоза им. М.В. Ломоносова.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Ковнеристый Ю.К., Лазарева И.Ю., Раваев А.А. Материалы, поглощающие СВЧ-излучения. М.: Наука, 1982. 165 с.
- [2] Ирюшкина Л.Ф., Воробьева Н.И. // Обзоры по ЭТ. Сер. 6. Материалы. М.: ЦНИИЭ, 1988. Вып. 9(1415) 40 с.
- [3] Алмин Б.Ф. // Зарубежная радиоэлектроника. 1989. № 2. С. 75-82.
- [4] Вейнгер А.И., Забродский А.Г., Красиков Л.А., Хорошева Н.И. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 21. С. 59-61.
- [5] Ключник А.В., Лозовик Ю.Е., Нерсесян О.Н. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. № 15. С. 948-951.
- [6] Галстян Е.А., Раваев А.А. // Известия вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30. № 10. С. 1243-1248.
- [7] Раваев А.А., Seleznev V.D. // MRS Symp. L. April 17-20, 1990. San Francisco, USA. Abstr. L10.10. P. 298.

- [8] Раваев А.А., Ковнеристый Ю.К., Лазарева И.Ю. // Докл. У Всесоюз. науч.-техн. конф. „Методы и средства измерений материалов на ВЧ и СВЧ“. Новосибирск: СНИИМ, 1983, май, С. 107-108 // Измерение комплексной диэлектрической проницаемости гетерогенных материалов. Препринт. М.: ИМЕТ, 1983. № 1. 31 с.
- [9] Казанцев Ю.Н., Красножен А.П., Тихонов А.В. // Радиотехника и электроника. 1990. Т. 35. № 6. С. 1140-1146.
- [10] Левин Л. Теория волноводов. М.: Радио и связь, 1981. 312 с.
- [11] Петров Ю.И. Физика малых частиц. М.: Наука, 1982. 360 с.
- [12] Хижняк Н.А. Интегральные уравнения макроскопической электродинамики. Киев: Наукова думка, 1986. 280 с.
- [13] K h a r a d l y M.M.Z., C h o i A.S.-V. // IEEE Trans. Ant. Propag. 1988, V. AP-36, N 2. P.282-296.
- [14] Пазынин Л.А., Скирта Е.А., Сологуб В.Г. // В кн.: Распространение радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Харьков: ИРЭ АН УССР, 1988. С. 24-38.
- [15] Райзер В.Ю., Шарков В.А., Эткин В.С. // Электрические и излучательные характеристики воды в дециметровом и метровом диапазонах. Препринт. М.: ИКИ АН СССР, 1974. № 164. 29 с.
- [16] Мальцев В.П., Шевченко В.В. // Радиотехника и электроника. 1990. Т. 35. № 5. С. 1084-1086.
- [17] Муратов Р.З. Потенциалы эллипсоида. М.: Атомиздат, 1976. 144 с.
- [18] Муратов Р.З. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 11. С. 2097-2104.
- [19] Киреев В.А. Курс физической химии. М.: Химия, 1978. 620 с.
- [20] Кускова Н.И. // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 5. С. 924-925.
- [21] Кускова Н.И. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 23. С. 56-60.
- [22] Бородин И.Ф. // Электричество. 1989. № 6. С. 1-8.

Московский  
радиотехнический  
институт АН СССР

Поступило в Редакцию  
14 февраля 1991 г.