

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 α -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 $\mathcal{E} = \mathcal{E}' + i\mathcal{E}''$, а также обнаруженные особенности поведения HV в импульсных СВЧ полях $E \approx 10^6$ В·м⁻¹. Конструкция HV весьма проста - слой зерна между двумя диэлектрическими пластинами; толщина его определяется рабочим диапазоном длин волн: $(4-5)\lambda$. Проницаемость \mathcal{E} рассчитывалась по формулам [8] через измеренные в 3-сантиметровом волноводном тракте энергетические коэффициенты отражения и прохождения излучения через „образец” $\mathcal{E} = 2.37 + i0.20$ на частоте $\omega = 6 \cdot 10^{10}$ с⁻¹.

В задачах синтеза ПЭВ с диэлектрическим типом поглощения рассматривают в основном материалы с нормальной дисперсией компонентов: $\mathcal{E} = \mathcal{E}' + i\mathcal{E}''/\omega\mathcal{E}_0$, где \mathcal{E}_0 - удельная проводимость, \mathcal{E}_0 - диэлектрическая постоянная. В [9] отмечается ряд преимуществ плоскостойных ПЭВ с дебаевской дисперсией $\mathcal{E}(\omega)$. Примером такой среды является вода, которая и служит в качестве

поглощающей фазы HV: после длительной сушки в термокамере поглощающие свойства зерна заметно упали ($\epsilon_g = 1.72 + i 0.041$). Естественное диспергирование H_2O в материале (отдельных зернах) обеспечивает согласование ПЭВ со свободным пространством.

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

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

где $\epsilon_1 = 1$ – проницаемость воздуха; $\nu = 0.42$ – объемная концентрация ядрышек зерен („шелухой“ пренебрегаем, иначе расчеты приведут к физически неверному результату). Отсюда находим $\epsilon_h = 2.71 + i 0.10$. 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 ϵ''_W в СВЧ диапазоне можно пренебречь. При $T = 20$ °C и времени релаксации $\tau_D = 9.22 \cdot 10^{-12}$ с получаем $\epsilon_W \approx 61.3 + i 32.4$.

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

$$\epsilon_2 = \nu_W \epsilon_W + (1 - \nu) \epsilon_h \approx 11.1 + i 4.93.$$

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:

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

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 $L = L^* = (1/9) \sum_i (\varepsilon_2 - 1) \times [1 + f_i (\varepsilon_2 - 1)]^{-1}$, где f_i — факторы деполаризации [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;

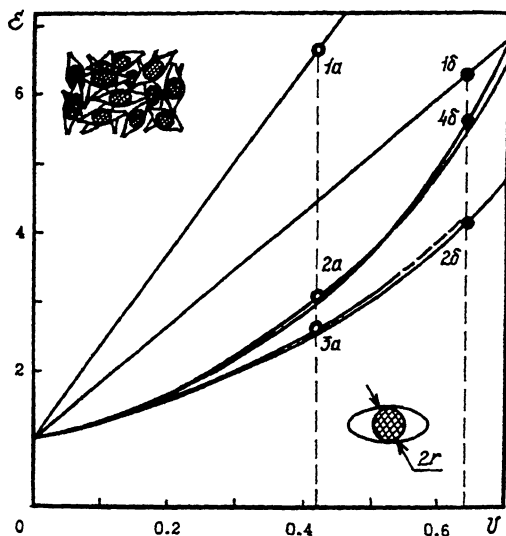
2) строгое уравнение (3) можно заменить формулой (2), если уменьшить ε_2 на фиксированную величину Δ . Действительно, приравняв (2) и (3) и осуществив двойное разложение в ряд Маклорена, получим

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

Это выражение в первом приближении не зависит от параметра σ (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 Δ) дает $\varepsilon = 2.47 + i0.196$. Коэффициент поглощения $\beta = (2\pi/\lambda) \text{Im} \sqrt{\varepsilon} = 0.131 \text{ см}^{-1}$ или 1.14 дБ/см . Расчетные данные хорошо совпадают с экспериментальными. Точность расчета может быть повышена путем учета двухслойной структуры семян в эквивалентной проницаемости ε_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 $f = 10$ Гц коэффициент поглощения плавно (за время $\tau_o = 30-60$ 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 Лихтнекера (2), 3 - формула Левина (3), 4 - то же для эллиптических частиц; а - ε_2 , $\varepsilon_p = 14.5$; б - $\varepsilon_2 = 9.37$.

температуры $\Delta T \propto J_0 \tau^* / M c$, 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 $q = (8\pi/3)(r^3/\sigma)\beta \approx 0.013$ см² и $\Delta T \leq 1^\circ\text{C}$. Более того, расчет (1) показывает, что поглощающие свойства H_2O 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 H_2O , видимо, можно отнести к подвиду лиофобных коллоидных систем - студиям с ограниченной набухаемостью [19] и предположить, что ионы H^+ при диссоциации накапливаются (до насыщения за время τ^*) 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 H_2O 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 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⁻³, $\nu \approx 1.4 \cdot 10^5$ с⁻¹, энергия активации процесса $U = 0.58$ эВ [20]. Концентрация ρ находится из соотношения $\sigma \approx 2 e \mu^+ \rho$, $\mu^+ = 3.62 \cdot 10^{-7}$ м²/В·с - подвижность ионов 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 раскочки колебаний возможно понижение эффективной энергии активации $U^*(\omega)$. Величина $\tau_d \sim \tau^* \approx 10^{-3} \text{ с}$ соответствует $U^* \approx 0,32 \text{ эВ}$, что вполне вероятно. На уменьшении U^* и в итоге τ_d может сказаться и наличие ξ -потенциала двойного слоя мицеллы [19]. В физически сложной биосистеме, какой является зерно HV , возможны отличия и других коэффициентов.

Таким образом, термополевая диссоциация позволяет качественно объяснить инерционный процесс изменения свойств HV 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 возростанию – 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. Радиопизика. 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 g 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.