ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1992. Т. 33, № 5

АСТРОНОМИЯ

УДК 550.34.052

Z-ПАРАМЕТРЫ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ АНТЕННАХ

А. В. Гусев, А. В. Цыганов

(ГАИШ)

Рассчитана система Z-коэффициентов пьезопреобразователя как датчика малых смещений твердотельной гравитационной антенны веберовского типа.

1. Введение

Наиболее общий анализ динамических и шумовых характеристик твердотельных гравитационных антенн (ТГА) [1] с пьезопреобразователем может быть сделан на основе теории линейных четырехполюсников [2, 3]. Пьезопреобразователь как линейный четырехполюсник с Z-параметрами описывается следующей системой уравнений [4]:

$$F_\mu = \frac{k^D}{p} v_\mu + \frac{h}{p} I, \quad V = \frac{h}{p} v_\mu + \frac{1}{pc^\varepsilon} I. \tag{1}$$

Здесь F_μ, v_μ — механические сила и скорость; V, I — напряжение и ток с электрической стороны; $p=d/dt$; $k^D=E^D s_0/r$, $c^\varepsilon=\varepsilon^\varepsilon s_0/r$ — механическая жесткость и емкость преобразователя; E^D и ε^ε — модуль упругости и диэлектрическая проницаемость пьезоматериала, измеренные при постоянных величинах потока электрической энергии и механической деформации; s_0 и r — площадь и толщина пьезопластины; h — коэффициент преобразования.

В работе [5] на основе флуктуационно-диссипативной теоремы [6] определены первичные шумовые параметры преобразователя [1], обусловленные потерями в пьезоматериале: $k^D=k^D(p)$, $c^\varepsilon=c^\varepsilon(p)$.

Целью предлагаемой работы является расчет системы Z-параметров пьезопреобразователя как датчика смещений ТГА. Простейшая модель ТГА представляет однородный стержень длины L, в середине которого расположен жестко связанный со стержнем пьезоэлемент. Обратное влияние пьезопреобразователя на ТГА учитывается введением «объемных» сил $P_{01,2}(t)\delta(x-x_{01,2})$, где $x_{01,2}=(L\pm r)/2$.

2. Вывод основных соотношений

Пусть x_0 — точка приложения сосредоточенной силы $P_0(t)\delta(x-x_0)$, $0<x_0<L$. Тогда для спектра продольных колебаний $\dot{u}(x, j\omega)$ упругого стержня получим [7]

$$\left(\frac{d^2}{dx^2}+k^2\right)\dot{U}(x,\ j\omega) = -E^{-1}\dot{P}_0(j\omega)\delta(x-x_0) \tag{2}$$

с граничными условиями

$$E\left.\frac{d\dot{u}(x,\ j\omega)}{dx}\right|_{x=0,L} = \dot{P}_{1,2}(j\omega).$$

Здесь использованы следующие обозначения: $k = \omega/v_s$, $v_s = (E/\rho)^{1/2}$ — скорость звука; E — модуль упругости; ρ — плотность; $\dot{P}_{1,2}(j\omega)$ — спектры внешних сил.

Общее решение неоднородного уравнения (2) может быть представлено в виде

$$\dot{U} = A\exp\{jkx\} + B\exp\{-jkx\} - (kE)^{-1}\dot{P}_0 \sin k(x - x_0) V(x - x_0), \tag{3}$$

где $V(x)$ — симметричная функция.

Неизвестные постоянные $A(j\omega)$, $B(j\omega)$ находим из граничных условий:

$$A,\ B = -(2kE\sin kL)^{-1}[\dot{P}_2 + \dot{P}_0 \cos k(L - x_0) - \dot{P}_1 \exp\{\mp jkL\}]. \tag{4}$$

Подстановка (4) в (3) приводит к следующему результату:

$$\dot{U} = -(kE\sin kL)^{-1}[\dot{P}_2\cos kx - \dot{P}_1\cos k(L - x) + p_0(\cos k(L - x_0)\cos kx + \sin kL\cdot\sin k(x - x_0)\cdot V(x - x_0))],\quad 0 < x_0 < L. \tag{5}$$

Принимая во внимание, что $kE = \omega^2 M(kLS)^{-1}$, где $M = \rho LS$ — масса стержня, S — площадь торцов, из (5) находим относительное смещение $\Delta\dot{U}(r, j\omega) = \dot{U}(x_2, j\omega) - \dot{U}(x_1, j\omega)$ при $x_{1,2} = (1/2)L \pm r$:

$$\Delta\dot{U} = kLS\left(M\omega^2\cos\frac{kL}{2}\right)^{-1}\left[(\dot{P}_1 + \dot{P}_2 + \dot{P}_0\cos k(L - x_0))\sin\frac{kr}{2} - \dot{P}_0\cos\frac{kL}{2}\left(V\left(\frac{L+r}{2} - x_0\right)\sin k\left(\frac{L+r}{2} - x_0\right) - V\left(\frac{L-r}{2} - x_0\right)\sin k\left(\frac{L-r}{2} - x_0\right)\right)\right]. \tag{6}$$

Абсолютная частота ω_0 основной моды определяется уравнением

$$\cos\frac{k_0 L}{2} = \cos\frac{\omega_0 L}{2} = 0,\ k_0 L = \omega_0 L/v_s = \pi. \tag{7}$$

Полагая в (6) $\omega = \omega_0 - \Omega$, $|\Omega| \ll \omega_0$, с учетом (7) можем записать

$$\Delta_0\dot{U} \approx 2S(M\omega_0\Omega)^{-1}[\dot{P}_1 + \dot{P}_2 + \dot{P}_0\cos k_0(L - x_0)]\sin\frac{k_0 r}{2}. \tag{8}$$

Формулу (8) легко обобщить на случай нескольких сосредоточенных сил:

$$\Delta_0\dot{U} \approx 2S(M\omega_0\Omega)^{-1}\left[\dot{P}_1 + \dot{P}_2 + \sum_i \dot{P}_{0i}\cos k_0(L - x_{0i})\right]\sin\frac{k_0 r}{2}. \tag{9}$$

Из (9) при $i = 1, 2$ и $x_{01,2} = x_{1,2} = (1/2)(L \mp r)$ находим:

$$\Delta_0\dot{U} \approx [2(M/4)\omega_0\Omega]^{-1}\left(F_s - F_0\sin\frac{k_0 r}{2}\right)\sin\frac{k_0 r}{2}, \tag{10}$$

где $F_s = (P_1 + P_2)S$, $F_0 = (P_{01} - P_{02})S = F_\mu(S/S_0)$.

Обращение (10) $\Delta_0\dot{U}(r, j\omega) \leftrightarrow \Delta_0 U(r, t)$ приводит к следующему уравнению:

$$M_e(p + \omega_0^2/p)(p\Delta_0 U) \approx (F_s - a(S/S_\mu)F_\mu)a, \tag{11}$$

где $M_e = (M/4)$ — эквивалентная масса, $a = k_0 r(2L)^{-1} = (\pi/2)(r/L) \ll 1$.

Отметим, что для гравитационного излучения [1] $F_s = F_h = -(8/\pi^2) M_e \omega_0{}^2 h(t) L$, где $h(t)$ — вариации метрики.

3. Расчет системы Z-параметров пьезопреобразователя для ТГА

Пусть $F = a(S/S_0) F_M$, $v = a^{-1} p(\Delta_0 U)$. Тогда из (11), (1) при $v_\mu = p(\Delta_0 u) = av$ находим

$$F = a^2 (S/S_0) k^D p^{-1} v + a(S/S_0) h p^{-1} I,$$
$$V = ahp^{-1} v + (pc^\varepsilon)^{-1} I. \tag{12}$$

Система уравнений (12) описывает электромеханический преобразователь на основе пьезоэлектрического эффекта как линейный четырехполюсник, Z-параметры которого равны:

$$Z_{11}(p) = a^2 (S/S_0) k^D p^{-1};\ Z_{12}(p) = a(S/S_0) hp^{-1};$$
$$Z_{21}(p) = ahp^{-1};\ Z_{22}(p) = (pc^\varepsilon)^{-1}. \tag{13}$$

Входное сопротивление невзаимного преобразователя (12) в режиме холостого хода $Z_{11}(p)$ можно преобразовать к виду

$$Z_{11}(p) = \beta M_e \omega_0^2/p,\ \beta = (r/L)(E^D/E). \tag{14}$$

Важной характеристикой ТГА с пьезодатчиком оказывается выходное сопротивление $Z_{\text{out}}(p)$ [3]:

$$Z_{\text{out}}(p) = Z_{22}(p) - \frac{Z_{12}(p)\, Z_{21}(p)}{Z_c(p) + Z_{11}(p)}, \tag{15}$$

где $Z_c(p) = M_e(p + 2\delta_e + \omega_0^2/p)$ — импеданс механической системы, δ_e — затухание основной моды.

Пусть $K_{e\mu}$ — коэффициент электромеханической связи, $K_{e\mu} = h(c^\varepsilon/k^D)^{1/2}$ [4]; тогда $Z_{12}(p)\, Z_{21}(p) = (h/p)^2 a^2 (s/s_0) = K_{e\mu}^2 k^D (pc^\varepsilon)^{-1} Z_{11}(p)$. Поэтому, принимая во внимание (14), (15), находим

$$Z_{\text{out}}(p) \approx \frac{1}{pc^\varepsilon}\left[1 - \frac{K_{e\mu}^2 \beta \omega_0^2}{(p^2 + 2\delta_e p + \omega_1^2)}\right],$$

где $\omega_1 = \omega_0(1 + \beta/2)$.

4. Пример

ТГА «ГАИШ» в Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга имеет следующие параметры: $L \approx 1{,}5$ м; $\rho \approx 2{,}7 \cdot 10^3$ кг/м^3; $S \approx 0{,}3$ м^2; $E \approx 67$ ГПа; $v_s = 5080$ м/с. Отсюда находим

$$M_e = (L\rho S)/4 \approx 304 \text{ кг},\ f_0 = u_s/2L = 1693 \text{ Гц}.$$

Параметры пьезоэлектрических материалов из группы титаната цирконата свинца ЦТС: $K_{e\mu} \approx 0{,}4$; $d \approx 200 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н — пьезомодуль; $\varepsilon \approx 1{,}1 \cdot 10^3$ — диэлектрическая проницаемость. Геометрические размеры пьезотаблетки: $S_0 \approx 10^{-3}$ м^2, $r \approx 3 \cdot 10^{-2}$ м. Модуль упругости пьезоматериала E_D находим по формуле [5]

$$E^D = K_{e\mu}^2 (1 - K_{e\mu}^2)^{-1} \varepsilon_0 \varepsilon d^{-2} \approx 43 \text{ ГПа}$$

($\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ — диэлектрическая постоянная).

Тогда получим: $\beta \approx 1{,}28 \cdot 10^{-2}$, $a \approx 3 \cdot 10^{-2}$, $S/S_0 \approx 3 \cdot 10^2$; $h \approx$
$\approx d^{-1} K_{e\mu}^2 (1 - K_{e\mu}^2)^{-1} \approx 10^8$ В/м, $c_0^{\varepsilon} \approx 15$ пФ.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Бичак И., Руденко В. Н. Гравитационные волны и проблемы их обнаружения. М., 1987. [2] Харкевич А. А. Теория электроакустических преобразователей. Волновые процессы. М., 1973. [3] Айнбиндер И. М. Входные каскады радиоприемников. М., 1973. [4] Филатов Г. А., Баев Е. Ф., Цымбалюк В. С. Малогабаритные низкочастотные механические фильтры. М., 1974. [5] Гусев А. В., Мележников И. В.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1991. 32, № 2. С. 33. [6] Рытов С. М. Введение в статистическую радиофизику. М., 1974. [7] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. М., 1987.

Поступила в редакцию
27.11.91

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1992. Т. 33, № 5

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 536.631

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ПОЛУПРОВОДНИК—МЕТАЛЛ НА ГИДРАТНЫЙ ПОКРОВ ПЛЕНОК ДИОКСИДА ВАНАДИЯ

А. В. Зотеев, Н. Л. Левшин, С. Ю. Поройков

(кафедра общей физики и молекулярной электроники)

Электрофизическим и масс-спектроскопическим методами исследовалось влияние фазового перехода полупроводник—металл на процессы гидратации и дегидратации поликристаллических пленок диоксида ванадия. В области температур, соответствующей фазовому переходу, а также в металлической фазе диоксида ванадия обнаружено возрастание десорбционной способности, а также ускорение адсорбционно-десорбционных процессов.

Адсорбционные и электрофизические свойства реальных поверхностей полупроводников-оксидов в значительной мере определяются состоянием гидратного покрова, который включает в себя гидроксильные группы OH, а также молекулы воды, прочно связанные координационными ($(H_2O)_c$) и более слабыми водородными связями ($(H_2O)_h$) [1]. За изменение электрофизических параметров поверхности, его заряда ΔQ_s и поверхностной проводимости ответственны изменения концентрации OH-групп и молекул $(H_2O)_c$ на поверхности; молекулы $(H_2O)_h$ практически не влияют на эти параметры. В литературе подробно исследовано влияние термической и радиационной обработки оксидов в вакууме на состав гидратного покрова [1]. Вместе с тем нам неизвестны работы по влиянию фазового перехода в твердом теле на степень гидратации поверхности. Исследование этих процессов особенно актуально в связи с обнаруженным нами в [2] влиянием адсорбции паров H_2O на температуру T_c фазового перехода полупроводник—металл (ФППМ) в пленках VO_2, когда их сопротивление R при T_c=340 К уменьшается на 4 порядка (рис. 1, кривая *1*).

В настоящей работе мы исследовали процесс дегидратации пленки VO_2 в интервале температур от 300 до 385 К, включая область ФППМ, методом масс-спектроскопии. Проводился ступенчатый прогрев образца с интервалом 15 К и временем стабилизации температуры пленки на каждой ступеньке 30 мин. Анализ продуктов десорбции