

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА ОТ НАНОМАТЕРИАЛОВ

© 2016

Б. В. Скворцов доктор технических наук, профессор кафедры электротехники, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, aps@ssau.ru

Д. М. Живоносная аспирант, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, Jivonosnovsky@mail.ru

В статье рассматривается актуальная задача контроля электромагнитных параметров тонких плёнок и наноматериалов. Представлено обоснование метода бесконтактного контроля таких электромагнитных параметров как проводимость, а также диэлектрическая и магнитная проницаемости. Предложенный метод основан на зондировании контролируемой поверхности импульсным электромагнитным сигналом с последующим его анализом. Приведены аналитические соотношения, связывающие амплитуду и фазу отражённого сигнала с его спектральной составляющей, коэффициентом отражения, волновыми сопротивлениями контролируемой среды и среды распространения сигнала, а также с конструктивными параметрами измерительной системы, такими как угол падения зондирующего импульса и расстояния до объекта измерения. Произведён поиск диапазона эффективных измерений, позволяющий определить область применения метода, и анализ полученных зависимостей. Приведены графики зависимостей амплитуды и фазы отражённого сигнала от основных электромагнитных характеристик исследуемого материала.

Наноматериалы; проводимость; диэлектрическая проницаемость; магнитная проницаемость.

Цитирование: Скворцов Б.В., Живоносная Д.М. Исследование коэффициента отражения электромагнитного импульсного сигнала от наноматериалов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 204-208. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-204-208

Задача определения таких электромагнитных параметров (ЭМП) наноматериалов как проводимость (σ), диэлектрическая (ϵ) и магнитная (μ) проницаемости является важной для создания различных электронных приборов и защитных материалов, в том числе STELS-технологий. В работе [1] представлен способ измерения ЭМП, заключающийся в том, что излучатель, находящийся в среде с известными электромагнитными параметрами $\mu_1, \sigma_1, \epsilon_1$ (как правило, это газовая среда), формирует направленный импульсный электромагнитный сигнал, падающий на материал с контролируемыми электромагнитными параметрами $\mu_x, \sigma_x, \epsilon_x$ под углом θ_1 . Отражённый от поверхности сигнал, попадающий в приёмник, несёт в себе информацию об искомых электромагнитных параметрах. Амплитуда $A(\omega)$ и фаза $\varphi(\omega)$ спектра отражённого от контролируемой плёнки сигнала определяются по формулам, приведённым в [2]:

$$A(\omega) = |G(j\omega)| |S(0, j\omega)| e^{-\alpha(\omega)R}; \quad (1)$$

$$\varphi(\omega) = \varphi_G(\omega) + \varphi_0(\omega) + \frac{\omega R}{V_\phi(\omega)}, \quad (2)$$

где $G(j\omega) = \frac{1}{2} \left[\frac{Z_2 \cos \theta_1 - Z_1 \cos \theta_2}{Z_2 \cos \theta_1 + Z_1 \cos \theta_2} + \frac{Z_2 \cos \theta_2 - Z_1 \cos \theta_1}{Z_2 \cos \theta_2 + Z_1 \cos \theta_1} \right] = |G(j\omega)| e^{\varphi_G(\omega)}$ – коэффициент отражения;

$Z_1 = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}}$; $Z_2 = \sqrt{\frac{j\omega\mu_x}{\sigma_x + j\omega\varepsilon_x}}$ – волновые сопротивления среды зондирования и отражающей среды соответственно; $\varphi_G(\omega) = \arg G(j\omega)$ – фаза коэффициента отражения;

$$\theta_2 = \arcsin \left[\frac{\mu(\varepsilon\omega + \sqrt{\sigma^2 + \varepsilon^2\omega^2})}{\mu_x(\varepsilon_x\omega + \sqrt{\sigma_x^2 + \varepsilon_x^2\omega^2})} \sin \theta_1 \right];$$

$V_\phi = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu(\varepsilon\omega + \sqrt{\sigma^2 + \varepsilon^2\omega^2})}}$; $\alpha = \sqrt{\frac{\mu\omega(\sqrt{\sigma^2 + \varepsilon^2\omega^2} - \varepsilon\omega)}{2}}$ – соответственно фазовая скорость и коэффициент затухания электромагнитного сигнала в среде зондирования;

$|S(0, j\omega)|$ – модуль спектра зондирующего импульса; $\varphi_0(\omega) = \text{arctg} \frac{\sigma}{\omega\varepsilon}$ – фаза спектра зондирующего импульса; μ, σ, ε – электромагнитные параметры среды зондирования;

θ_1, R – соответственно угол падения и путь электромагнитного сигнала от излучателя до приёмника (конструкционные параметры).

Произведём поиск диапазона эффективных измерений электромагнитных параметров по формулам (1)–(2) путём расчёта амплитуды и фазы спектра отражённого импульса при изменении одного из параметров и фиксации двух других.

Амплитуда отражённого сигнала увеличивается с ростом магнитной и диэлектрической проницаемостей (рис. 1, а, б), как и фаза с ростом магнитной проницаемости (рис. 1, в). Однако при возрастании диэлектрической проницаемости в фазе сигнала наблюдается ярко выраженный минимум, связанный с особенностями изменения аргумента коэффициента отражения (рис. 1, в).

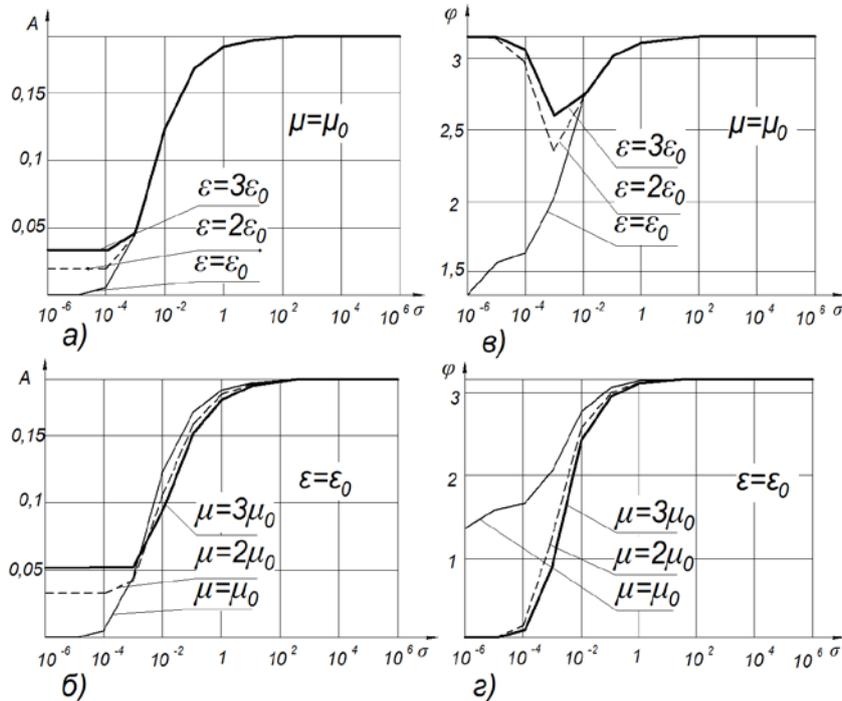


Рис. 1. Зависимость амплитуды (а, б) и фазы (в, г) отражённого сигнала от электрической проводимости при различных диэлектрических и магнитных проницаемостях ($\mu_0 = 1.256 \cdot 10^{-6}$, $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$)

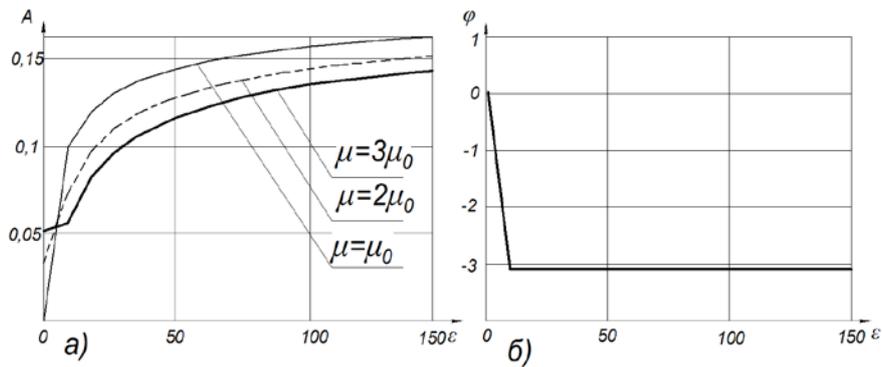


Рис. 2. Зависимость амплитуды (а) и фазы (б) отражённого сигнала от диэлектрической проницаемости при различных магнитных проницаемостях ($\sigma=0$)

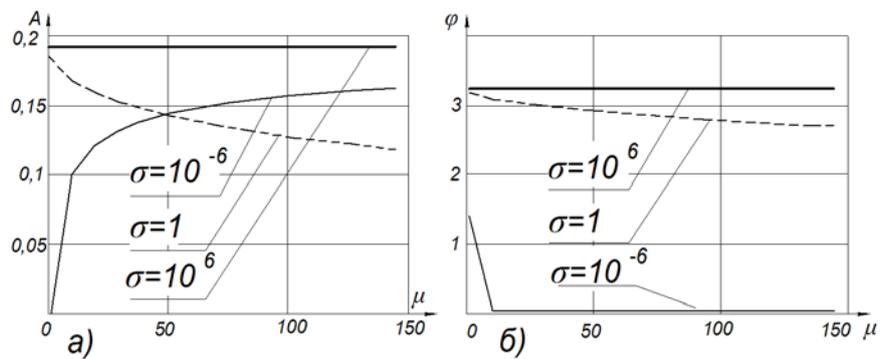


Рис. 3. Зависимость амплитуды (а) и фазы (б) отражённого сигнала от магнитной проницаемости при различных электрических проводимостях ($\epsilon=\epsilon_0$)

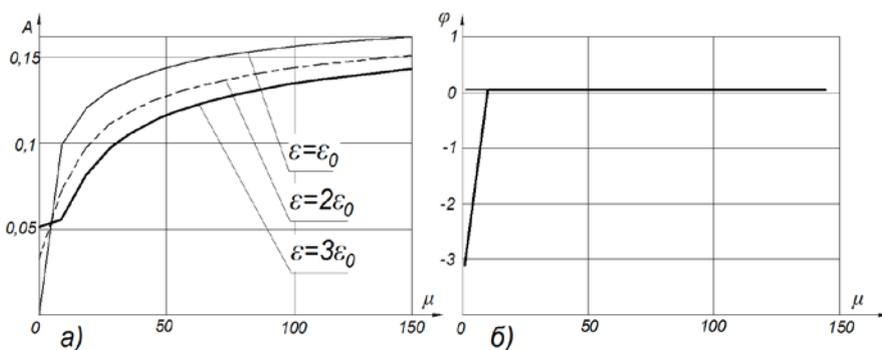


Рис. 4. Зависимость амплитуды (а) и фазы (б) отражённого сигнала от магнитной проницаемости при различных значениях диэлектрической проницаемости ($\sigma=0$)

Из рис. 2 следует, что изменение магнитной проницаемости при нулевом значении проводимости слабо влияет на фазу сигнала из-за специфики изменения волнового сопротивления среды.

Расчёты показали, что амплитуда и фаза спектра отражённого сигнала изменяются с ростом магнитной проницаемости при проводимостях менее 10^2 [1/Ом·м] и не зависят от магнитной проницаемости при больших проводимостях (рис. 3).

На рис. 4 приведены зависимости параметров отражённого сигнала от магнитной проницаемости материала при различных значениях диэлектрической проницаемости.

Амплитуда отражённого сигнала возрастает с увеличением магнитной проницаемости. Фаза слабо зависит от данных параметров.

Нелинейность полученных характеристик вполне ожидаема и связана с резонансным характером дисперсионных процессов электронного взаимодействия внутреннего поля материалов с внешним возбуждающим сигналом. Расчёты проводились в пакете «Mathcad» для частоты $\omega = 10^8$. Длительность импульсного сигнала $\tau = 10^{-7}$ с.

Полученные результаты позволяют определить границы поиска электромагнитных параметров тонких плёнок и наноматериалов при их измерениях методом импульсного зондирования и создают базу априорных данных для определения электромагнитных параметров методом электромагнитного зондирования наноматериалов.

Статья содержит результаты прикладных научных исследований, проводимых при финансовой поддержке Минобрнауки России. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57414X0094.

Библиографический список

1. Борминский С.А., Скворцов Б.В., Солнцева А.В. Устройство бесконтактного контроля электромагнитных параметров тонких плёнок и наноматериалов: патент РФ № 156519; заявл. 8.07.15; опубл. 11.10.15; бюл. № 31.

2. Скворцов Б.В., Живоносновская Д.М., Курылёва П.А. Теоретические основы бесконтактных измерений электромагнитных параметров наноматериалов // Сборник тезисов докладов пятой международной конференции «От наноструктур, наноматериалов и нанотехнологий к nanoиндустрии». Ижевск: Ижевский государственный технический университет, 2015. С. 221-222.

RESEARCH OF THE COEFFICIENT OF REFLECTION OF THE ELECTROMAGNETIC PULSE FROM THIN FILMS AND NANOMATERIALS

© 2016

B. V. Skvortsov Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Electrical Engineering, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, aps@ssau.ru

D. M. Zhivonosnovskaya postgraduate student, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, Jivonosnovsky@mail.ru

The article deals with the vital task of measuring electromagnetic parameters of thin films and nanomaterials based on the sensing of surface controlled by pulsed electromagnetic signal. A method of non-contact control of such parameters as conductivity, as well as dielectric and magnetic permeability is justified. The proposed method is based on the sensing of the controlled surface by a pulsed electromagnetic signal with its subsequent analysis. Analytical relations that relate the phase and amplitude of the reflected signal to its spectral component, coefficient of reflection, self-surge impedances of the controlled medium and the signal propagation medium, as well as to the design parameters of the measurement system, such as the angle of incidence of the probing pulse and the distance to the object of measurement are presented. A brief mathematical description of the method is given. The dependence of the parameters of the reflected signal on the basic electromagnetic properties of materials is demonstrated.

Nanomaterials; conductivity; dielectric constant and magnetic permeability.

Citation: Skvortsov B.V., Zhivonosnovskaya D.M. Research of the coefficient of reflection of the electromagnetic pulse from thin films and nanomaterials. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 3. P. 204-208. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-204-208

References

1. Borminskiy S.A., Skvortsov B.V., Solntseva A.V. *Ustroystvo beskontaktnogo kontrolya elektromagnitnykh parametrov tonkikh plenok i nanomaterialov* [Device of non-contact control of electromagnetic parameters of thin films and nanomaterials]. Patent RF, no. 156519; 2015. (Publ. 11.10.15, bull. no. 31).

2. Skvortsov B.V., Zhivonosnovskaya D.M., Kuryleva P.A. Teoreticheskie osnovy beskontaktnykh izmereniy elektromagnitnykh parametrov nanomaterialov. *Sbornik tezisov dokladov pyatoy mezhdunarodnoy konferentsii «Ot nanostruktur, nanomaterialov i nanotekhnologiy k nanoindustrii»*. Izhevsk: Kalashnikov Izhevsk State Technical University Publ., 2015. P. 221-222. (In Russ.)