
МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ, КОНТРОЛЯ, ДИАГНОСТИКИ

УДК 681(06)

ЭКСПРЕСС-МЕТОДИКА БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НЕБОЛЬШИХ ОБРАЗЦОВ НА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ

Поклонский Н.А., Сягло А.И., Шнитко В.Т., Меркулов В.А., Давиденя М.О., Ковалев А.И.

Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

Разработана установка с отражательным СВЧ-резонатором типа H_{101} для бесконтактного измерения электрических параметров небольших (диаметром ≤ 5 мм) образцов. Получено аналитическое выражение для расчета коэффициента отражения мощности СВЧ-излучения H_{101} -резонатором с находящимся в нем образцом в зависимости от диэлектрической проницаемости и электропроводности образца. Экспериментально найдена зависимость отражения СВЧ-мощности от диаметра металлических и стеклянных шариков при их свободном падении через резонатор. (E-mail: Poklonski@bsu.by)

Ключевые слова: электроника СВЧ, теория цепей СВЧ, микроволновая техника, резонаторные системы, неразрушающий контроль.

Введение

При измерениях электрических параметров материалов на сверхвысоких частотах (СВЧ) электромагнитного излучения можно бесконтактным способом определять электрическую проводимость материала, находящегося в СВЧ-резонаторе [1–4]. При этих измерениях регистрируется изменение добротности и/или расстройка частоты СВЧ-резонатора. В частности, СВЧ-диагностика может быть использована для бесконтактного измерения проводимости и фотопроводимости синтетических алмазов [4–6]. Синтетический алмаз легируется донорными и акцепторными примесями, а также обладает достаточно высокой подвижностью и электронов, и дырок [7, 8]. Измерив электрическую проводимость кристалла алмаза, можно судить о его качестве – о количестве примесей в нем и совершенстве его кристаллической структуры.

Известные методы СВЧ-диагностики основываются на сравнении резонансной частоты и

добротности СВЧ-резонатора с образцом и без него [3, 4, 9]. В предлагаемой измерительной установке используется отражательный СВЧ-резонатор типа H_{101} . Внесение образца в резонатор изменяет коэффициент отражения СВЧ-излучения резонатором. Поэтому, измеряя мощность отраженного излучения, можно определять электрические свойства образца.

В работе предложена установка для СВЧ-диагностики электрической проводимости образцов, свободно падающих через резонатор: представлена схема установки, дано теоретическое обоснование метода. Продемонстрирован эффект влияния удельной проводимости образца на коэффициент отражения мощности СВЧ-излучения H_{101} -резонатором на примере металлических и стеклянных шариков.

Схема установки

В предлагаемой установке проводимость исследуемого образца определяется при «про-

лете» его через СВЧ-резонатор в поле силы тяжести. Используется прямоугольный резонатор типа H_{101} с двумя сквозными отверстиями, которые являются запредельными волноводами [10, 11], и не изменяют характеристики резонатора. Частота f_{r0} пустого H_{101} -резонатора согласована с частотой генератора СВЧ-излучения. Исследуемый образец под действием силы тяжести пролетает рабочую область резонатора за несколько миллисекунд. Находясь в рабочей области резонатора, образец изменяет коэффициент отражения мощности СВЧ-излучения резонатором, причем коэффициент отражения зависит от удельной электропроводности и диэлектрической проницаемости образца [1, 2].

Принципиальная схема устройства с рабочим резонатором для экспресс-диагностики электрических параметров на СВЧ небольших образцов представлена на рисунке 1. Создаваемое генератором (2) СВЧ-излучение на частоте $\omega/2\pi \approx 10$ ГГц через вентиль-фланец (3), аттенуатор (4) и циркулятор (5) попадает в рабочий H_{101} -резонатор (6). В качестве генератора СВЧ-излучения использовался диод Ганна. СВЧ-излучение, отраженное резонатором, регистрируется детекторным диодом (7), оцифровывается специализированным контроллером (8) и передается на персональный компьютер (9). Специализированный контроллер обеспечивает усиление входного сигнала с детекторного диода, подачу напряжения на генератор СВЧ-излучения и ток смещения на детекторном диоде. Частота дискретизации АЦП, входящего в состав контроллера составляет 6,4 кГц и позволяет получать до 200 точек отсчета для измерений за время пролета образца через резонатор.

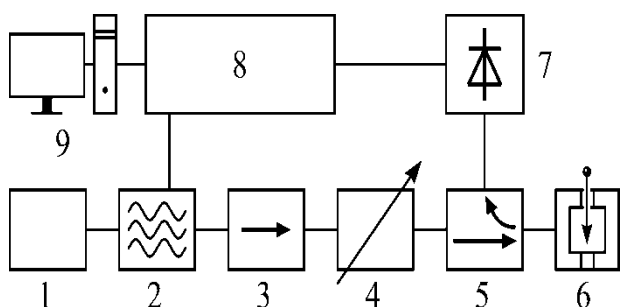


Рисунок 1 – Схема установки с рабочим резонатором: 1 – стабилизирующий резонатор; 2 – генератор СВЧ-излучения; 3 – вентиль-фланец; 4 – аттенуатор; 5 – циркулятор; 6 – рабочий резонатор; 7 – детекторный диод; 8 – специализированный контроллер; 9 – персональный компьютер

Обмен данными между контроллером и управляющим персональным компьютером осуществляется по принципу «запрос-ответ» с использованием MODBUS-протокола [12].

Программное обеспечение позволяет задавать следующие параметры установки: частоту дискретизации АЦП контроллера, время измерения, напряжение на генераторе СВЧ-излучения для подстройки частоты, ток смещения на детекторном диоде.

Расчет коэффициента отражения мощности СВЧ-излучения резонатором

В данном разделе выведены формулы для оценки коэффициента отражения мощности СВЧ-излучения резонатором с находящимся в нем образцом в зависимости от параметров самого резонатора и образца.

Исследуемый образец «пролетает» через отражательный объемный СВЧ-резонатор типа H_{101} за время ≈ 30 мс, что много больше периода колебаний стоячих электромагнитных волн в резонаторе ($\approx 0,1$ нс). Поэтому при расчетах отклика отражательного СВЧ-резонатора можно считать, что образец покоится в центре резонатора (квазистатическое приближение).

Найдем коэффициент отражения Γ мощности СВЧ-излучения резонатором при известных параметрах: удельной электрической проводимости образца σ , диэлектрической проницаемости образца ϵ_r , размерах эллипсоидального образца вдоль трех координатных осей d_{xx} , d_{yy} , d_{zz} , угловой частоте СВЧ-излучения в резонаторе ω , размерах полости резонатора (длине l_x , ширине l_y , высоте l_z) и добротности резонатора Q_{r0} .

Эквивалентную схему резонатора представим в виде колебательного контура, характеризующегося тремя параметрами [13]: эффективной емкостью C_r , эффективной индуктивностью L_r и эффективным сопротивлением R_r . Величины L_r и R_r выражаются через собственную угловую частоту колебаний $\omega_r = 2\pi f_r$, емкость C_r и добротность Q_r резонатора так:

$$L_r = \frac{1}{\omega_r^2 C_r}, \quad R_r = \frac{1}{\omega_r C_r Q_r}. \quad (1)$$

Коэффициент отражения мощности СВЧ-излучения резонатором равен [13, 14]:

$$\Gamma(\omega) = \frac{|Z_r(\omega) - R_g|}{|Z_r(\omega) + R_g|} = \frac{|i\omega L_r + (i\omega C_r)^{-1} + R_r - R_g|}{|i\omega L_r + (i\omega C_r)^{-1} + R_r + R_g|}, \quad (2)$$

где $Z_r(\omega)$ – импеданс резонатора, R_g – эффективное сопротивление СВЧ-тракта и генератора.

Для пустого H_{101} -резонатора эффективную емкость, индуктивность и сопротивление (C_{r0} , L_{r0} и R_{r0}) можно рассчитать при известных l_x , l_y , l_z и Q_{r0} . Величина C_{r0} равна отношению квадрата заряда q^2 на внутренней поверхности резонатора к удвоенной энергии поля $2W_{el}$ в объеме резонатора [13]:

$$C_{r0} = \frac{q^2}{2W_{el}} = \varepsilon_0 \frac{\left(\oint_{S_c} \mathbf{E}_0 \, ds \right)^2}{\int_{V_c} |\mathbf{E}_0|^2 \, dv} = \varepsilon_0 \frac{128q_x l_z}{\pi^4 l_y}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85$ пФ/м, S_c – площадь внутренней поверхности полости резонатора, $ds = \mathbf{n} \, ds$ – элемент поверхности полости резонатора, \mathbf{n} – вектор нормали к поверхности, $V_c = l_x l_y l_z$ – объем полости резонатора, $dv = dx \, dy \, dz$ – элемент объема полости резонатора, $\mathbf{E}_0 = (E_{0(x)}, E_{0(y)}, E_{0(z)})$ – напряженность электрической компоненты СВЧ-излучения в пустом резонаторе; для H_{101} -электромагнитных колебаний (моды):

$$\begin{aligned} E_{0(x)} &= 0, \quad E_{0(y)} = E_A \sin(\pi x/l_x) \sin(\pi z/l_z), \\ E_{0(z)} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Согласно (4) поле не зависит от координаты u и направлено вдоль оси y ; максимум электрической компоненты СВЧ-поля находится в середине резонатора. Конфигурация электрического поля в H_{101} -резонаторе показана на рисунке 2.

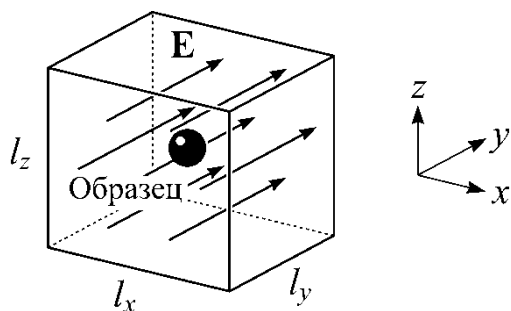


Рисунок 2 – Электрическая компонента \mathbf{E} микроволнового поля и исследуемый образец в прямоугольном СВЧ-резонаторе типа H_{101}

Собственная угловая частота для пустого H_{101} -резонатора [13]:

$$\omega_{r0} = 2\pi f_{r0} = \frac{\pi}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \sqrt{\frac{1}{l_x^2} + \frac{1}{l_z^2}}, \quad (5)$$

где $\mu_0 = 1,26$ мкГн/м.

Согласно работам [15, 16] относительное изменение собственной комплексной угловой частоты колебаний резонатора $(\omega_{rc} - \omega_{rc0})/\omega_{rc}$ при помещении в него образца есть:

$$\frac{\omega_{rc} - \omega_{rc0}}{\omega_{rc}} = \frac{-(\varepsilon_s - 1) \int_{V_s} (\mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{E}_1) \, dv}{2 \int_{V_c} (\mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{E}_1) \, dv}, \quad (6)$$

где $V_s = \eta V_c$ – объем образца; $\eta < 1$ – фактор заполнения образцом резонатора; \mathbf{E}_1 – напряженность электрической компоненты СВЧ-поля в полости резонатора с образцом; ε_s – комплексная относительная диэлектрическая проницаемость образца. В формуле (6) принято, что относительная магнитная восприимчивость образца равна единице. Полагаем также, что образец изменяет емкость резонатора ($C_r \neq C_{r0}$), но не влияет на индуктивность резонатора:

$$L_r = L_{r0} = (\omega_{r0}^2 C_{r0})^{-1}. \quad (7)$$

Далее считаем, что объем образца мал по сравнению с объемом полости резонатора:

$$\eta = V_s/V_c \ll 1, \quad (8)$$

и образец расположен в центре резонатора (напряженность магнитной компоненты СВЧ-поля в центре H_{101} -резонатора мала [13]). Тогда напряженность электрической компоненты СВЧ-поля в образце (см., например, [17]):

$$E_{1(y)} = \frac{E_{0(y)}}{1 + (\varepsilon_s - 1)n^{(y)}},$$

где

$$n^{(y)} = \frac{1}{2} d_{sx} d_{sy} d_{sz} \int_0^\infty \frac{d\xi}{(\xi + d_{sy}^2) \sqrt{(\xi + d_{sx}^2)(\xi + d_{sy}^2)(\xi + d_{sz}^2)}}. \quad (9)$$

Для сферического образца ($d_{sx} = d_{sy} = d_{sz} = d_s$) $n^{(y)} = 1/3$, ослабление напряженности электрической компоненты поля $E_{1(y)}/E_{0(y)} = 3/(2 + \varepsilon_s)$.

Подстановка (4) и (9) в подынтегральные выражения формулы (6), дает:

$$\int_{V_c} (\mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{E}_1) \, dv \approx \int_{V_c} E_{0(y)}^2 \, dv = \frac{E_A^2 l_x l_y l_z}{4},$$

$$\int_{V_s} (\mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{E}_1) dv \approx \frac{E_{0(y)}^2 \Big|_{x=l_x/2, y=l_y/2, z=l_z/2}}{1 + (\varepsilon_s - 1)n^{(y)}} =$$

$$= V_s \frac{E_A^2}{1 + (\varepsilon_s - 1)n^{(y)}}.$$

Тогда при учете вычисленных выше интегралов относительное изменение частоты резонатора по формуле (6) есть:

$$\frac{\omega_{rc} - \omega_{rc0}}{\omega_{rc}} = \frac{-(\varepsilon_s - 1)}{1 + (\varepsilon_s - 1)n^{(y)}} \frac{2V_s}{l_x l_y l_z} =$$

$$= \frac{-2(\varepsilon_s - 1)}{1 + (\varepsilon_s - 1)n^{(y)}} \eta. \quad (10)$$

Согласно [1, 2] величина ε_s выражается через действительную относительную диэлектрическую проницаемость образца ε_r и его удельную электрическую проводимость σ в виде:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_r + \frac{\sigma}{i\varepsilon_0\omega}, \quad (11)$$

а величина ω_{rc} – через ω_r и Q_r :

$$\omega_{rc} = \omega_r \left(\sqrt{1 - \frac{1}{(2Q_r)^2}} - \frac{i}{2Q_r} \right). \quad (12)$$

Незначительное изменение комплексной угловой частоты ($\omega_{rc} \approx \omega_{rc0}$) резонатора с большой добротностью

$$Q_r \gg 1, \quad (13)$$

при учете (12) можно представить так:

$$\frac{\omega_{rc} - \omega_{rc0}}{\omega_{rc0}} \approx \frac{\omega_r - \omega_{r0}}{\omega_{r0}} + \frac{i}{2} \left(\frac{1}{Q_r} - \frac{1}{Q_{r0}} \right). \quad (14)$$

Выделяя мнимую и действительную части выражения (10) с учетом (11) и (14), получаем:

$$\frac{i}{2} \left(\frac{1}{Q_r} - \frac{1}{Q_{r0}} \right) =$$

$$= i \frac{-2(\sigma/\varepsilon_0\omega)\eta}{(1 + \varepsilon_r n^{(y)} - n^{(y)})^2 + (\sigma n^{(y)}/\varepsilon_0\omega)^2}, \quad (15)$$

$$\frac{\omega_r - \omega_{r0}}{\omega_r} =$$

$$= \frac{-2(-1 + \varepsilon_r + n^{(y)} - 2\varepsilon_r n^{(y)} + \varepsilon_r^2 n^{(y)} + (\sigma/\varepsilon_0\omega)^2 n^{(y)})\eta}{(1 + \varepsilon_r n^{(y)} - n^{(y)})^2 + (\sigma n^{(y)}/\varepsilon_0\omega)^2} \equiv$$

$$\equiv -\eta \cdot F(\varepsilon_r, \sigma/\varepsilon_0\omega, n^{(y)}), \quad (16)$$

где для упрощения обозначений введена безразмерная функция F . При постоянной индуктивности ($L_r = L_{r0}$) имеем:

$$\frac{\omega_r - \omega_{r0}}{\omega_{r0}} = 1 - \sqrt{\frac{C_r}{C_{r0}}} = -\eta \cdot F(\varepsilon_r, \sigma/\varepsilon_0\omega, n^{(y)}). \quad (17)$$

Из (17) находим:

$$C_r = C_{r0}(1 + \eta \cdot F(\varepsilon_r, \sigma/\varepsilon_0\omega, n^{(y)}))^2. \quad (18)$$

Итак, коэффициент $\Gamma(\omega)$ рассчитывается по формуле (2); величины Q_r , ω_r , C_r , R_r и $L_r = L_{r0}$ – по формулам (15), (16), (18) и (1); ω_{r0} и C_{r0} – по формулам (5) и (3). Для расчета $\Gamma(\omega)$ необходимы значения параметров l_x , l_y , l_z , Q_{r0} , η , $n^{(y)}$, ε_r и σ ; фактор $n^{(y)} = 1/3$ для сферического образца.

На рисунке 3 приведены результаты расчетов коэффициента Γ в зависимости от удельной электрической проводимости образца σ .

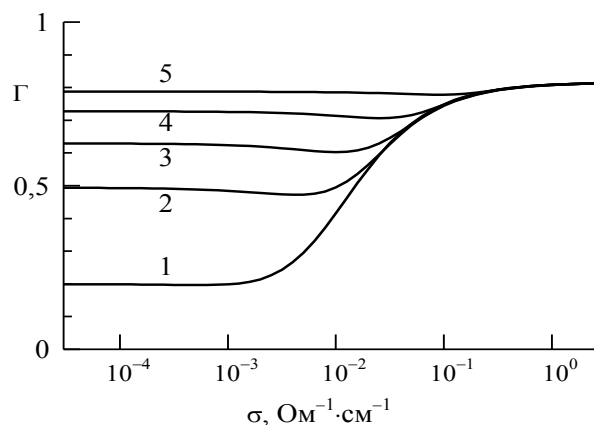


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента отражения Γ мощности СВЧ-излучения H_{101} -резонатором от удельной электрической проводимости σ образца для пяти значений относительной диэлектрической проницаемости образца ε_r : 1,5 (1); 3 (2); 5 (3); 10 (4); 30 (5)

Для расчетов использовались следующие значения параметров. Параметры резонатора: $Q_{r0} = 100$, $l_x = 18$ мм, $l_y = 15$ мм, $l_z = 22$ мм. Частота СВЧ-излучения ($f = \omega/2\pi = 10,8$ ГГц) вы-

биралась равной собственной частоте резонатора ($\omega = \omega_{r0}$, см. (5)). Образец сферической формы ($d_{sx} = d_{sy} = d_{sz} = d_s$) с диаметром $d_s = 3$ мм (фактор заполнения $\eta = \pi d_s^3 / (6l_x l_y l_z) = 0,0024$). Расчеты по формуле (2) проведены для пяти значений относительной диэлектрической проницаемости образца: $\epsilon_r = 1,5$; $\epsilon_r = 3$; $\epsilon_r = 5$; $\epsilon_r = 10$; $\epsilon_r = 30$. Из рисунка 3 видно, что коэффициент отражения Γ для малых и больших σ практически не зависит от удельной электропроводности образца, причем Γ не зависит от ϵ_r для $\sigma > 0,3 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

Определим критерий «низкой» и «высокой» удельной электропроводности. Заметим, что при большой добротности резонатора ($Q_r \gg 1$) при помещении образца в резонатор в формуле (2) изменение слагаемого $(i\omega C_r)^{-1}$ по абсолютной величине существенно превышает изменение величины $R_r = (\omega_r C_r Q_r)^{-1}$. Отсюда следует, что значительное изменение Γ происходит при тех условиях, при которых резко меняется C_r и значение функции $F(\epsilon_r, \sigma / (\epsilon_0 \omega), n^{(y)})$ (см. формулу (17)), т.е. при некотором критическом значении удельной электрической проводимости образца $\sigma = \sigma_0 = \epsilon_r \epsilon_0 \omega$. Для алмаза ($\epsilon_r = 5,7$) на частоте $f = 10$ ГГц проводимость $\sigma_0 = 0,032 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ [7]. При $\sigma \ll \sigma_0$ образец проявляет себя как диэлектрик, а при $\sigma \gg \sigma_0$ – как проводник.

Определим коэффициент отражения мощности СВЧ-излучения резонатором с находящимся в нем образцом с конечной величиной удельной электропроводности.

Для упрощения оценки коэффициента отражения (см. формулу (2)) используем следующие приближения:

1. Частота СВЧ-излучения ω , попадающего в резонатор, немного отличается от резонансной частоты ω_{r0} пустого резонатора. Для связи ω и ω_{r0} введем параметр $|\delta_\omega| \ll 1$ «расстройки» частоты резонатора:

$$\delta_\omega = \omega / \omega_{r0} - 1. \quad (19)$$

2. Изменение мнимой части импеданса $|(\omega C_r)^{-1} - (\omega_{r0} C_r)^{-1}|$ существенно превышает изменение действительной части импеданса $|R_r - R_{r0}| = |(\omega Q_r C_r)^{-1} - (\omega_{r0} Q_r C_r)^{-1}|$. Это условие выполняется при $Q_r \gg 1$.

3. Сопротивление генератора незначительно отличается от сопротивления резонатора:

$$R_g \approx R_{r0} \approx R_r. \quad (20)$$

Подставляя C_r из (18), R_r из (1) и L_r из (7) формулу (2) с учетом (8), (13), (19) и (20), получаем:

$$\begin{aligned} \Gamma(\omega) &= \\ &= \frac{|i\omega_{r0}(1 + \delta_\omega)L_r + (i\omega_{r0}(1 + \delta_\omega)C_r)^{-1} + R_r - R_g|}{|i\omega_{r0}(1 + \delta_\omega)L_r + (i\omega_{r0}(1 + \delta_\omega)C_r)^{-1} + R_r + R_g|} \approx \\ &\approx \frac{|\delta_\omega + \eta F(\epsilon_r, \sigma / \epsilon_0 \omega, n^{(y)})| Q_{r0}}{\sqrt{((\delta_\omega + \eta F(\epsilon_r, \sigma / \epsilon_0 \omega, n^{(y)})) Q_{r0})^2 + 1}}. \quad (21) \end{aligned}$$

Для сферически симметричных образцов ($n^{(y)} = 1/3$) с высокой удельной электропроводностью ($\sigma / \epsilon_0 \omega \gg \epsilon_r$) функция $F(\epsilon_r, \sigma / (\epsilon_0 \omega)) \approx 6$ и коэффициент отражения СВЧ-мощности резонатором:

$$\Gamma \approx \frac{|\delta_\omega + 6\eta| Q_{r0}}{\sqrt{((\delta_\omega + 6\eta) Q_{r0})^2 + 1}}. \quad (22)$$

Итак, измеряя коэффициент отражения Γ мощности СВЧ-излучения резонатором (с образцом), зная фактор заполнения $\eta \ll 1$ образцом резонатора, а также относительную диэлектрическую проницаемость ϵ_r образца, можно из формул (21) и (16) определить величину его удельной электропроводности σ .

Отражение СВЧ-мощности H_{101} -резонатором, содержащим образец с малой или большой электропроводностью

В данном разделе продемонстрировано измерение коэффициента отражения мощности СВЧ-излучения резонатором при пролете через резонатор металлических и стеклянных шариков.

Измеряя коэффициент отражения Γ мощности СВЧ-излучения резонатором для образцов с большой удельной электропроводностью разного размера, с помощью формулы (22) можно определить расстройку частоты δ_ω и добротность резонатора Q_{r0} . Для реализации этой процедуры проводились измерения с металлическими шариками различного диаметра d_s . Измеренные временные профили коэффициента отражения, получаемые при пролете металлических и стеклянных шариков разного диаметра, показаны на рисунке 4.

Коэффициент отражения Γ определялся как отношение измеряемого на детекторном диоде напряжения к максимальному измеряемому напряжению, соответствующему положению в центре резонатора металлического шарика диаметром 5 мм. Измеренные значения коэффициента отражения, соответствующие положениям шариков в центре резонатора: $\Gamma \approx 0,32$ для $d_s = 2,3$ мм; $\Gamma \approx 0,09$ для $d_s = 3$ мм; $\Gamma \approx 0,58$ для $d_s = 3,3$ мм; $\Gamma \approx 0,93$ для $d_s = 4$ мм; для пустого резонатора $\Gamma \approx 0,59$. Близкие значения коэффициента отражения получаются по формуле (22), если $Q_{r0} = 70$ и $\delta_\omega = -0,011$ (рисунок 5). Отметим, что небольшая расстройка резонатора по частоте позволяет расширить интервал измеряемых значений Γ .

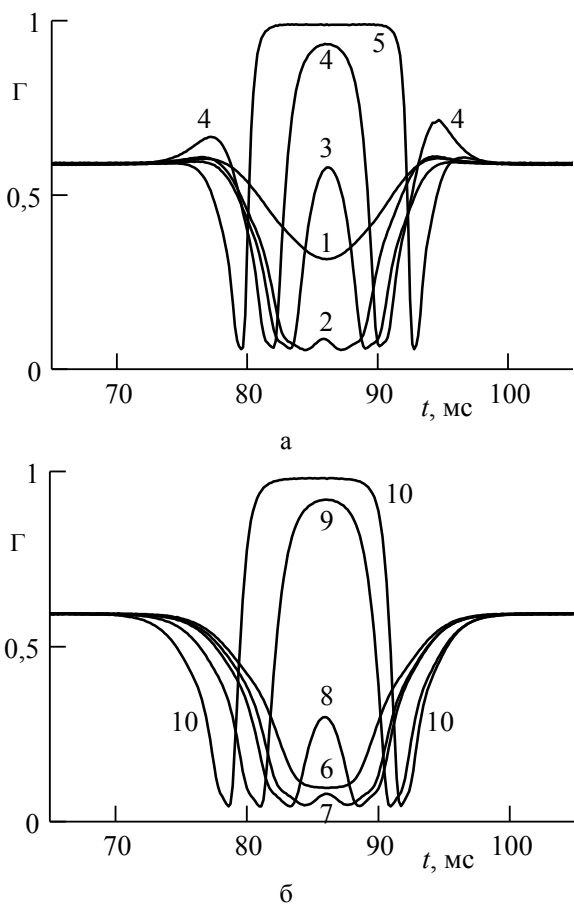


Рисунок 4 – Измеренные временные профили коэффициента отражения Γ мощности СВЧ-излучения резонатором, получаемые при пролете через резонатор сферических образцов: а – металлические шарики с диаметром d_s , мм: 2,3 (1); 3 (2); 3,3 (3); 4 (4); 5 (5); б – стеклянные шарики с диаметром d_s , мм: 3 (6); 3,3 (7); 3,7 (8); 4,3 (9); 4,9 (10)

На рисунке 5 показаны измеренные значения коэффициента отражения Γ резонатором с металлическими и стеклянными шариками, находящимися в центре резонатора. Показаны также зависимости коэффициента отражения Γ резонатором от диаметра образца d_s , рассчитанные по формулам (22) и (21) для $Q_{r0} = 70$ и $\delta_\omega = -0,011$; при расчете по формуле (21) использовались значения $\sigma = 0$ и $\epsilon_r = 5$ (проводимость и относительная диэлектрическая проницаемость стекла).

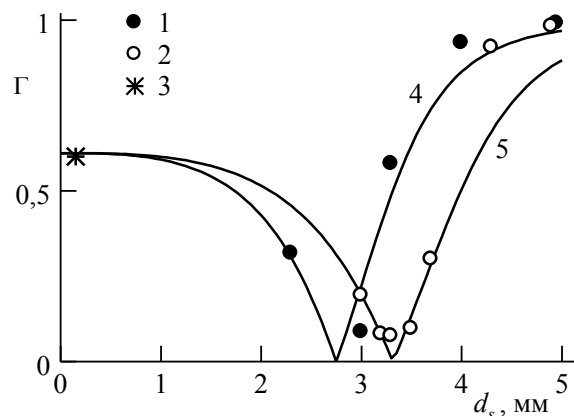


Рисунок 5 – Измеренные коэффициенты отражения Γ мощности СВЧ-излучения, соответствующие положению в центре резонатора металлических (1) и стеклянных (2) шариков диаметром d_s , коэффициент отражения пустым резонатором (3). Линии 4 и 5 – рассчитанные по формулам (22) и (21) зависимости от диаметра d_s сферического образца, помещенного в центр рабочего резонатора, коэффициента отражения для $\sigma/\epsilon_0\omega \gg \epsilon_r$ (параметры металла, линия (4)) и для $\sigma = 0, \epsilon_r = 5$ (параметры стекла, линия (5)). В расчетах использовались значения расстройки частоты $\delta_\omega = -0,011$ и добротности резонатора $Q_{r0} = 70$

Заключение

Предложена схема установки для бесконтактного измерения удельной электрической проводимости образцов небольшого размера. Она включает: СВЧ-тракт, специализированный контроллер для сопряжения СВЧ-тракта с компьютером и программное обеспечение. В отличие от известных методов СВЧ-измерений, когда образец для каждого измерения необходимо специально фиксировать в рабочем резонаторе, в предлагаемой методике образец пролетает через СВЧ-резонатор, что обеспечивает более быстрое измерение параметров образца.

Представлено теоретическое обоснование методики. Получено аналитическое выражение

для расчета коэффициента отражения мощности СВЧ-излучения объемным резонатором с помещенным в него образцом, характеризующимся размерами, диэлектрической проницаемостью и удельной электропроводностью. Получены соотношения, позволяющие по результатам измерений коэффициента отражения резонатором с пролетающими сквозь него металлическими шариками определить добротность и расстройку частоты резонатора.

Продемонстрированы согласующиеся с рассчитанными значениями результаты измерений коэффициента отражения для металлических и стеклянных шариков.

Работа выполнена при частичной поддержке подпрограммы «Кристаллические и молекулярные структуры» РБ.

Список использованных источников

1. Брандт, А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах / А.А. Брандт. – М. : ГИФМЛ, 1963. – 404 с.
2. Бесконтактные радиоволновые методы измерения электрофизических параметров полупроводниковых материалов / М.В. Детинко [и др.] // Изв. вузов. Физика. – 1992. – Т. 35, № 9. – С. 45–63.
3. Nag, B.R. A simple microwave method for monitoring the conductivity of semiconductor epitaxial layers / B.R. Nag, G. Ghosh, S. Dhar // Sol. St. Electron. – 1992. – Vol. 35, № 12. – P. 1823–1826.
4. Conductivity and photoconductivity in boron doped diamond films: Microwave measurements / F. Gevrey [et al.] // J. Appl. Phys. – 2001. – Vol. 90, № 8. – P. 4251–4255.
5. Особенности СВЧ-фотопроводимости природного алмаза в спектральной области 200–250 nm / А.Г. Захаров [и др.] // Физика твердого тела. – 2000. – Т. 42, № 4. – С. 647–651.
6. Захаров, А.Г. Сверхвысокочастотная фотопроводимость левитирующих над природным алмазом электронов / А.Г. Захаров, Н.А. Поклонский, В.С. Вариченко // Журнал технической физики. – 2000. – Т. 70, № 10. – С. 95–101.
7. Denisenko, A. Diamond power devices. Concepts and limits / A. Denisenko, E. Kohn // Diam. Relat. Mater. – 2005. – Vol. 14, № 3–7. – P. 491–498.
8. Collins, A.T. The Fermi level in diamonds / A.T. Collins // J. Phys.: Condens. Matter. – 2002. – Vol. 14. – P. 3743–3750.
9. Милыев, В.А. О резонаторном СВЧ методе исследования плазмы твердого тела / В.А. Милыев, В.А. Санина // Изв. вузов. Радиофизика. – 1980. – Т. 23, № 4. – С. 407–418.
10. Малков, Н.А. СВЧ-метод измерения диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь резиновых смесей / Н.А. Малков // Вестник ТГТУ. – 2007. – Т. 13, № 2А. – С. 460–466.
11. Кириллов, Л.Г. СВЧ устройства на запердельных волноводах / Л.Г. Кириллов, Ю.И. Двоскина // Зарубежная радиоэлектроника. – 1974. – № 3. – С. 93–120.
12. Modicon Modbus Protocol Reference Guide. – MODICON, Inc., Industrial Automation Systems, 1996. – 115 p.
13. Милованов, О.С. Техника сверхвысоких частот / О.С. Милованов, Н.П. Собенин. – М. : Атомиздат, 1980. – 464 с.
14. Лебедев, Я.С. ЭПР и релаксация стабилизированных радикалов / Я.С. Лебедев, В.И. Муромцев. – М. : Химия, 1972. – 256 с.
15. Spencer, E.G. Note on cavity perturbation theory / E.G. Spencer, R.C. LeCraw, L.A. Ault // J. Appl. Phys. – 1957. – Vol. 28, № 1. – P. 130–132.
16. Seidel, H. Frequency shifts in cavities with longitudinally magnetized small ferrite discs / H. Seidel, H. Boyet // Bell Syst. Tech. J. – 1958. – Vol. 37, № 3. – P. 637–655.
17. Зоммерфельд, А. Электродинамика / А. Зоммерфельд. – М. : ИЛ, 1958. – 502 с.

Poklonski N.A., Siahlo A.I., Shnitko V.T., Merkulov V.A., Davidenia M.O., Kovalev A.I.

Fast method of non-contact microwave measurements of electrical parameters of compact samples

The setup with a reflective microwave H_{101} resonator for the non-contact measurements of the electrical parameters of compact samples (the diameter less than 5 mm) is constructed. An analytical expression for calculation of the microwave power reflection coefficient by the H_{101} resonator with the sample being inside the resonator with respect to the dielectric permittivity and conductivity of sample is obtained. The dependence of the microwave power reflection on the diameter of the metallic and glassy globs freely falling through the resonator is experimentally found. (E-mail: Poklonski@bsu.by)

Key words: microwave electronics, theory of microwave circuits, microwave technics, resonator systems, non-destructing control.

Поступила в редакцию 15.03.2013.