
МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ, КОНТРОЛЯ, ДИАГНОСТИКИ

УДК 552.574[537.635+537.31]

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ НЕБОЛЬШИХ ОБРАЗЦОВ КАМЕННОГО УГЛЯ ПО ИХ ВЛИЯНИЮ НА СИГНАЛ СПИН-МЕТКИ В РЕЗОНАТОРЕ РАДИОСПЕКТРОМЕТРА

Поклонский Н.А., Вырко С.А., Поклонская О.Н., Горбачук Н.И., Сягло А.И.

Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь
e-mail: poklonski@bsu.by

Представлены результаты исследования при комнатной температуре на воздухе влияния нерезонансного поглощения сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного излучения образцами каменных углей различной массы в центре резонатора типа H_{102} на сигнал электронного спинового резонанса (ЭСР) эталона (спин-метки) в виде кристалла рубина, постоянно закрепленного на боковой стенке резонатора. Проведены количественные оценки СВЧ электропроводности исследованных образцов угля по данным ЭСР рубина. Результаты работы могут быть использованы для контроля электрических параметров углей в СВЧ диапазоне.

Ключевые слова: каменные угли, электронный спиновый резонанс, электропроводность в СВЧ диапазоне.

Введение

Для каменных углей характерна неоднородность как химического состава, так и структуры (строения), вследствие чего их свойства исследованы и интерпретированы далеко не в пределах желаемого (см., например, [1–4]). Возможно, что одной из причин, обуславливающих процесс неуправляемого диспергирования пластов каменных углей при их добыче, является изменение их микротвердости и электрической проводимости (особенно для углей, достигших в процессе метаморфизма границы фазового перехода «изолятор» – «электронный проводник» [5]). В связи с этим актуально исследование взаимосвязи электрических и механических свойств каменных углей – пористых природных материалов (см., например, [2]).

В литературе обсуждаются методы оценки СВЧ электропроводности образцов при реги-

страции ЭСР и образцов, и спин меток. Так, в работе [6] развита теория Дайсона спинового резонанса электронов проводимости и предложен метод расчета СВЧ электропроводности плоского образца из отношения A/B (амплитуды A низкополевого крыла линии ЭСР к амплитуде B высокополевого крыла), когда толщина образца меньше или примерно равна толщине скин-слоя. В работе [7] оценена СВЧ проводимость тонких полупроводниковых слоев путем измерений асимметрии (A/B) линии ЭСР примесей в изолирующей (рубиновой) подложке, вызванной расположенным на ее поверхности полупроводниковым слоем.

Диэлектрический материал, помещенный в резонатор, изменяет как амплитуду, так и фазу микроволнового (СВЧ) поля внутри резонатора. Так, в работе [8] исследовано влияние сферического сосуда, заполненного диэлектрической жидкостью (смесью воды с этанолом).

Установлено значительное различие в интенсивности и фазе сигнала спин-метки при размещении ее внутри и вне диэлектрической сферы.

В работе [9] радиоволновым методом проведена оценка проводимости эпитаксиальных полупроводниковых слоев, выращенных на диэлектрических или проводящих подложках. (Оценивалась добротность ограниченной секции волновода, выступающей в качестве резонатора, с помещенным внутрь образцом и без образца.) Недавно предложена и создана установка с отражательным СВЧ-резонатором типа H_{101} , позволяющая оценивать электрические параметры небольших (диаметром ≤ 5 мм) металлических и стеклянных шариков при их свободном пролете через резонатор [10].

В работе [11] исследованы парамагнетизм и электропроводность на переменном токе образцов композита сажа–полиэтилен. Показано, что асимметрия линии ЭСР отражает появление в образцах композита перколяционного кластера из частиц сажи (после перехода композита из «изолирующего» в «проводящее» состояние). Методом стационарного ЭСР при комнатной температуре исследованы [12] образцы каменного угля (с массовым содержанием углерода $\approx 89\%$) в виде штуфа (куска) и порошка. Обнаружено инвертирование синфазного (с модуляцией постоянного магнитного поля) сигнала ЭСР при увеличении размера штуфа (массой до 30 мг) вдоль магнитной компоненты микроволнового поля в резонаторе радиоспектрометра.

Итак, для ископаемых (каменных) углей актуальна разработка способов прогнозирования развития в них опасных для горных работ явлений, включающих взаимосвязь между переносом зарядов и спинов (магнитных моментов), которая может стимулировать деградиационные процессы в пласте (горной породе) [3].

Цель работы – установить зависимость сигнала электронного спинового резонанса эталона (спин-метки) от массы образцов каменного угля и оценить величину их СВЧ электрической проводимости.

Образцы и методика измерений

Исследованы каменные угли Донецкого месторождения. Из глыбы каменного угля выделены случайным образом десятки образцов в виде штуфов (кусков) с различной массой. Масса m каждого образца угля определялась на

аналитических весах (точность $\pm 0,2$ мг). Согласно работе [12], содержание углерода в исследуемых углях составляет ≈ 89 мас. %.

Регистрация сигналов ЭСР спин-метки и каменного угля выполнялась (по схеме на рисунке 1) на радиоспектрометре Radio PAN SE/X 2543, работающем в X -диапазоне ($f \approx 9,31$ ГГц) при синусоидальной модуляции (с амплитудой 0,1 мТл) постоянного поляризующего магнитного поля. СВЧ излучение генератора 4 облучает кристалл рубина, и образец угля, находящиеся в резонаторе 3, расположенном в магнитном поле между полюсными наконечниками электромагнита 2. В кристалле рубина и образце угля возникает переменная намагниченность на частоте модуляции 100 кГц. Регистрации этой намагниченности осуществляется детектором 6. Снимаемый с детектора сигнал поступает на блок управления и регистрации 8. (Осуществлялся контроль фазы детектированного сигнала по отношению к фазе модулирующего сигнала.)

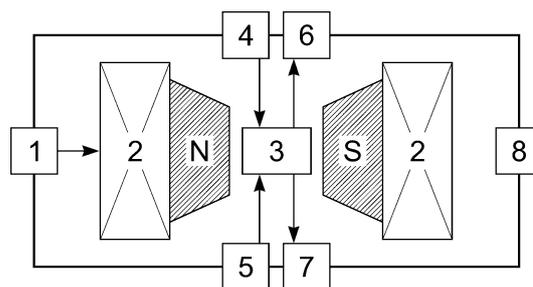


Рисунок 1 – Схема радиоспектрометра RadioPan SE/X-2543: 1 – источник питания электромагнита, блок стабилизации, развертки и измерения постоянного магнитного поля; 2 – электромагнит с магнитопроводом и полюсными (N, S) наконечниками; 3 – резонатор H_{102} ; 4 – СВЧ-генератор; 5 – блок модуляции магнитного поля; 6 – СВЧ-детектор сигнала ЭСР; 7 – частотомер; 8 – блок управления спектрометром, а также регистрации и обработки сигнала ЭСР

Чувствительность радиоспектрометра составляет $\approx 3 \cdot 10^{12}$ спин/мТл. Для измерения индукции B постоянного магнитного поля между полюсными наконечниками электромагнита используются датчики на основе протонного магнитного резонанса и эффекта Холла. Для контроля добротности резонатора, настройки фазы модуляции магнитного поля и калибровки сверхвысокочастотного электромагнитного излучения в H_{102} -резонаторе использовался кристалл рубина, приклеенный к внутренней стенке

резонатора (применялся клей, не дающий сигнала ЭСР) [13]. Образцы угля помещались внутрь тонкостенной кварцевой ампулы с внешним диаметром 5 мм и размещались в центре резонатора (в пучности магнитной компоненты СВЧ поля H_1). Регистрировался синфазный сигнал (фаза опорного (модулирующего) сигнала и фаза сигнала ЭСР на выходе синхронного детектора совпадают). Использовался стандартный режим регистрации спектров ЭСР с автоподстройкой частоты клистрона по измерительному H_{102} -резонатору. Выбор режимов регистрации ЭСР определялся известными (см., например, [14]) требованиями неискаженной регистрации первой производной сигнала резонансного поглощения по магнитной индукции внешнего магнитного поля. Частота электромагнитного излучения в резонаторе измерялась частотомером ЧЗ-54 с приставкой ЯЗЧ-46. Измерения ЭСР проводились при мощности СВЧ излучения ≈ 56 мВт. (Это соответствует линейному участку зависимости амплитуды A_{ry} сигнала ЭСР рубина от СВЧ-мощности.) Измерения проводилась для образцов с аспектным отношением (большого размера к меньшему), не превосходящим 1,3. Сигналы ЭСР (первая производная от резонансного поглощения СВЧ излучения по постоянно-му магнитному полю) рубина и образцов каменного угля регистрировались в лабораторных условиях (комнатная температура, на воздухе, в отсутствие освещения).

Результаты измерений и их обсуждение

На рисунке 2 приведены зарегистрированные сигналы ЭСР рубина (а) и образца угля массой 0,5 мг (б). Инвертирование сигнала ЭСР рубина по отношению к сигналу ЭСР угля вызвана различием направления напряженности модулирующего магнитного поля (с частотой 100 кГц) соответственно на стенке и в центре резонатора.

Амплитуда сигнала ЭСР кристалла рубина A_{ry} (расположенного на боковой стенке H_{102} -резонатора объемом V_r) в зависимости от массы t штуфа угля объемом V_s , расположенного в кварцевой ампуле в центре резонатора, изменялась, как показано на рисунке 3а. Изменение асимметрии A/B (амплитуды A низкополевого крыла линии ЭСР к амплитуде B высокополевого крыла) и ширины ΔB_{pp} (от пика до пика) линии сигнала ЭСР рубина с увеличением массы образца угля показаны на рисунке 3б.

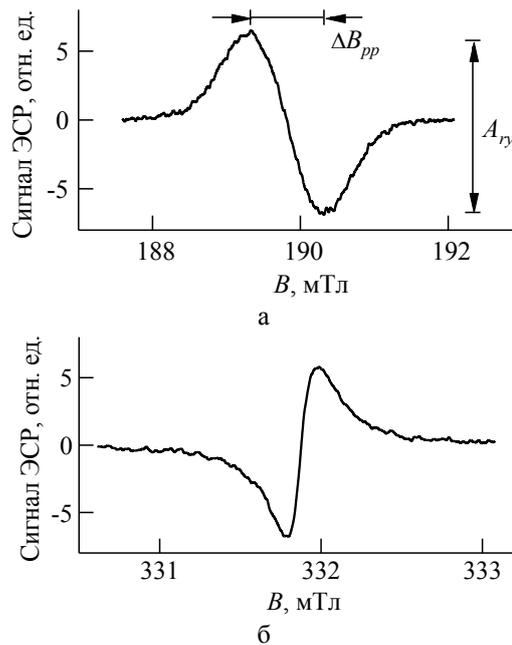


Рисунок 2 – Сигнал ЭСР: а – эталона рубина (кварцевая ампула с образцом угля массой 0,5 мг в центре резонатора); б – образца угля. Указаны ширина ΔB_{pp} и амплитуда A_{ry} сигнала рубина

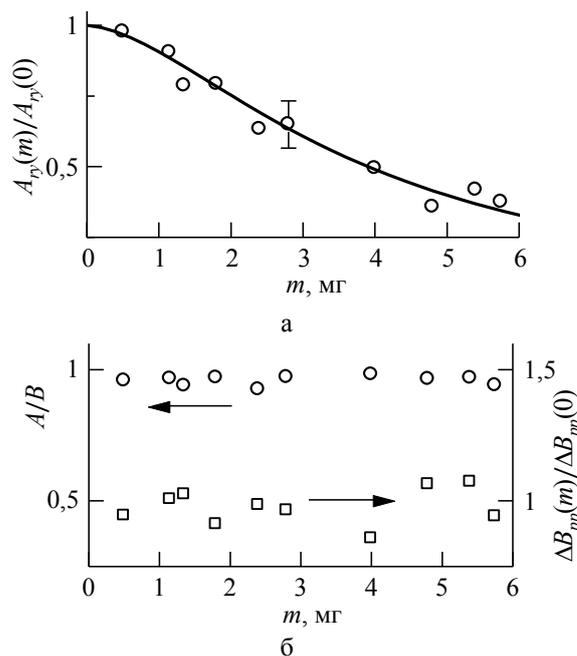


Рисунок 3 – а – Зависимость амплитуды сигнала ЭСР кристалла рубина (на стенке резонатора) A_{ry} от массы t образца угля объемом V_s , расположенного в центре резонатора: точки – эксперимент, линии – расчет по формуле (8) для образцов в форме куба ($a = 1$) при $Q_{ryq} = 5 \cdot 10^3$, $\zeta = 1$, $\sigma_1 = 40 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. б – Зависимости асимметрии A/B и ширины ΔB_{pp} сигнала рубина от массы угля. Зависимости нормированы на амплитуду $A_{ry}(0)$ и ширину $\Delta B_{pp}(0)$ сигнала рубина в отсутствие образца угля

Моделирование нерезонансного поглощения СВЧ излучения в углях

Распределение напряженностей магнитной H_1 и электрической E_1 компонент электромагнитного поля в пустом прямоугольном резонаторе H_{102} в декартовой системе координат (рисунок 4) описываются так (см., например, [15]):

$$\begin{aligned}
 H_{1X} &= \frac{H_0}{\sqrt{1+(L_Z/2L_X)^2}} \sin \frac{\pi x}{L_X} \cos \frac{2\pi z}{L_Z}, \\
 H_{1Z} &= \frac{-H_0}{\sqrt{1+(2L_X/L_Z)^2}} \cos \frac{\pi x}{L_X} \sin \frac{2\pi z}{L_Z}, \\
 E_{1Y} &= \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} H_0 \sin \frac{\pi x}{L_X} \sin \frac{2\pi z}{L_Z}, \\
 H_{1Y} &= 0, \quad E_{1X} = E_{1Z} = 0,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где $\epsilon_0 = 8,85$ пФ/м и $\mu_0 = 1,25$ мкГн/м – электрическая и магнитная постоянные. В соответствии с рисунком 4 координатная ось x направлена вдоль ампулы, а ось z – вдоль резонатора. Поле внутри резонатора распределено так, что энергии, запасенные в магнитной и электрической компонентах, равны.

Образец каменного угля (s) в кварцевой ампуле (q) помещается в точку $x = L_X/2, y = L_Y/2, z = L_Z/2$; кристалл рубина (ry) находится в точке $x = L_X/2, y = L_Y/2, z \approx L_Z$. Коэффициент заполнения резонатора рубином и ампулой во время измерений остаются неизменными.

Отношение амплитуды сигнала рубина $A_{ry}(m)$ для резонатора с образцом массой m к амплитуде сигнала рубина $A_{ry}(0)$ в отсутствие образца в ампуле при постоянной величине ΔB_{pp} определяется следующим образом (см., например, [15]):

$$\frac{A_{ry}(m)}{A_{ry}(0)} = \frac{(Q_{ryq}^{-1} + Q_s^{-1})^{-1}}{Q_{ryq}} = \frac{1}{1 + Q_{ryq}/Q_s},
 \tag{2}$$

где Q_{ryq} – добротность H_{102} -резонатора с кристаллом рубина (ry) на стенке и кварцевой ампулой (q), вставленной в центр резонатора, Q_s – добротность, определяемая электрическими потерями СВЧ-волны в штуфе угля объемом V_s , размещенного в центре H_{102} -резонатора объемом V_r . Следуя [15], имеем:

$$\frac{1}{Q_s} = \frac{\sigma_1 \zeta^2 \int_{V_s} E_1^2 dx dy dz}{\omega_r \mu_0 \int_{V_r} H_1^2 dx dy dz} =
 \tag{3}$$

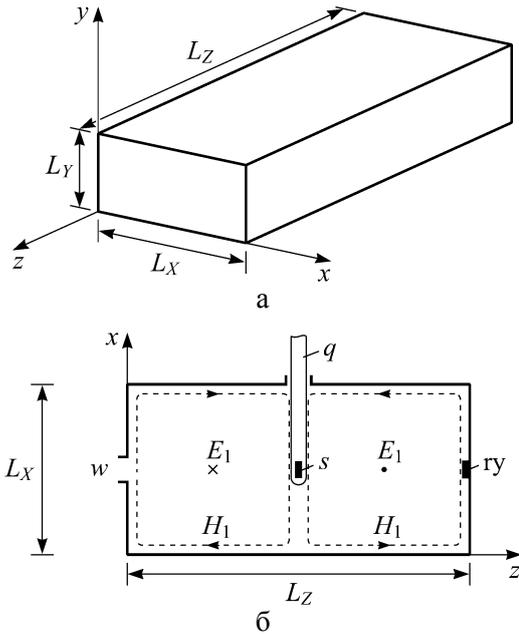


Рисунок 4 – а – Прямоугольный H_{102} -резонатор: $L_X = 2,25$ см, $L_Y = 1,0$ см, $L_Z = 4,5$ см.
 б – Размещение кварцевой ампулы (q) с образцом (s) в центре резонатора и кристалла рубина (ry) на стенке резонатора. Показаны отверстие связи (w) резонатора с СВЧ-трактом, а также электрическая (E_1) и магнитная (H_1) компоненты СВЧ поля в xz -плоскости при $y = L_Y/2$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\sigma_1 \zeta^2 (\mu_0/\epsilon_0) H_0^2 V_s J_s}{4\omega_r \mu_0 V_r \langle H_1^2 \rangle_r} = \frac{\sigma_1 \zeta^2 H_0^2 V_s J_s}{4\epsilon_0 \omega_r V_r H_0^2 / 4} = \\
 &= \frac{\sigma_1 \zeta^2 V_s J_s}{\epsilon_0 \omega_r V_r},
 \end{aligned}$$

где $\omega_r/2\pi \approx 9,3$ ГГц – частота СВЧ излучения, при которой наблюдается сигнал ЭСР рубина; $\zeta < 1$ – коэффициент ослабления электрической компоненты СВЧ поля E_1 внутри образца конечных размеров, зависящий от его формы; для шара (см., например, [16]): $\zeta = 3/(\epsilon_l + 2)$.

В формуле (3) введено обозначение

$$J_s = \frac{4}{V_s} \int_{V_s} \sin^2 \frac{\pi x}{L_X} \sin^2 \frac{2\pi z}{L_Z} dx dy dz,
 \tag{4}$$

где интегрирование проводится по объему V_s образца, размещенного в центре H_{102} -резонатора ($x = L_X/2, y = L_Y/2, z = L_Z/2$) объемом $V_r = L_X L_Y L_Z \approx 10$ см³.

Полная относительная диэлектрическая проницаемость угля $\epsilon_l/\epsilon_0 = \epsilon' + i\epsilon''$ на угловой частоте ω обусловлена (см., например, [17]) «локализованными» ($\epsilon_l = \epsilon_1 + i\epsilon_2$) и «свободными»

электронами ($i\sigma_{ac}/\omega$, где $\sigma_{ac} = \sigma_1 + i\sigma_2$) и записывается в виде: $\varepsilon_t = \varepsilon_l \varepsilon_0 + i\sigma_{ac}/\omega$. Диэлектрическая проницаемость и электропроводность угля (при $\omega \approx \omega_r$) соотносятся так [18, 19]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_t/\varepsilon_0 &= \varepsilon' + i\varepsilon'' = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 + i(\sigma_1 + i\sigma_2)/(\varepsilon_0\omega), \\ \varepsilon' &= \varepsilon_1 - \sigma_2/(\omega\varepsilon_0), \quad \varepsilon'' = \varepsilon_2 + \sigma_1/(\omega\varepsilon_0), \\ \varepsilon' &\approx \varepsilon_1, \quad \varepsilon'' \approx \sigma_1/(\omega\varepsilon_0). \end{aligned} \quad (5)$$

Рассмотрим нерезонансное поглощение СВЧ излучения в образце угля в форме параллелепипеда с ребрами длиной l_x, l_y, l_z вдоль осей x, y, z , т. е. объем образца $V_s = l_x l_y l_z$. Полагаем, что образцы были квадратного сечения ($l_y = l_z = b, l_x = ab = h$, где a – аспектное отношение), так что $V_s = hb^2 = ab^3$. Интеграл (4) в этом случае принимает вид:

$$\begin{aligned} J_s &= \frac{4}{V_s} \int_{(L_x-h)/2}^{(L_x+h)/2} \sin^2 \frac{\pi x}{L_x} dx \int_{(L_z-b)/2}^{(L_z+b)/2} \sin^2 \frac{2\pi z}{L_z} dz \times \\ &\times \int_{(L_y-b)/2}^{(L_y+b)/2} dy \equiv \frac{4}{V_s} \frac{h}{2} I_x(h/L_x) b \frac{b}{2} I_z(b/L_z) = \\ &= I_x(h/L_x) I_z(b/L_z). \end{aligned} \quad (6)$$

Интегрирование в формуле (6) дает:

$$\begin{aligned} \int_{(L_x-h)/2}^{(L_x+h)/2} \sin^2 \frac{\pi x}{L_x} dx &= \frac{h}{2} \left(1 + \frac{L_x}{\pi h} \sin \frac{\pi h}{L_x} \right) \equiv \frac{h}{2} I_x(h/L_x), \\ \int_{(L_y-b)/2}^{(L_y+b)/2} dy &= b, \\ \int_{(L_z-b)/2}^{(L_z+b)/2} \sin^2 \frac{2\pi z}{L_z} dz &= \frac{b}{2} \left(1 - \frac{L_z}{2\pi b} \sin \frac{2\pi b}{L_z} \right) \equiv \frac{b}{2} I_z(b/L_z). \end{aligned} \quad (7)$$

Итак, из (2) и (3) с учетом (6), (7) получаем конечную формулу:

$$\frac{A_{ry}(m)}{A_{ry}(0)} = \left(1 + Q_{ryq} \frac{\sigma_1 \zeta^2 V_s(m)}{\varepsilon_0 \omega_r V_r} J_s(m) \right)^{-1}, \quad (8)$$

где

$$J_s(m) = \left(1 + \frac{L_x}{\pi h(m)} \sin \frac{\pi h(m)}{L_x} \right) \left(1 - \frac{L_z}{2\pi b(m)} \sin \frac{2\pi b(m)}{L_z} \right).$$

Принимая во внимание, что масса образца $m = \rho V_s(m) = \rho a [b(m)]^3$, где $\rho \approx 1,7$ г/см³ – плот-

ность угля, получаем зависимость линейных размеров образца, входящих в формулу (8) от его массы: $b(m) = (m/\rho a)^{1/3}$, $h(m) = ab(m)$.

Отметим, что для неискаженной регистрации ЭСР образцов каменных углей в форме параллелепипеда обычно их линейные размеры выбираются в пределах: $h/L_x \leq 0,35$, $b/L_z \leq 0,15$.

Полагая добротность резонатора с рубином и пустой ампулой равной $Q_{ryq} = 5 \cdot 10^3$, коэффициент ослабления $\zeta = 1$ (при $\varepsilon_l \approx 2$ для порошкообразных образцов угля [19]) и СВЧ электропроводность $\sigma_1 \approx 40$ Ом⁻¹·м⁻¹ (что по порядку величины согласуется с данными [18]), получаем зависимость амплитуды сигнала ЭСР рубина $A_{ry}(m)$ от массы m образца угля в ампуле в центре резонатора, рассчитанную по формуле (8) при $b = h$ и показанную линией на рисунке 3а.

Заключение

Показано, что электрические потери в образцах каменных углей различной массы существенно влияют на параметры сигнала ЭСР спин-метки (кристалла рубина на стенке резонатора). Наблюдаемое уменьшение амплитуды сигнала ЭСР спин-метки обусловлено изменением добротности резонатора при помещении образца угля в кварцевой ампуле в центр резонатора. Полученные результаты позволяют путем измерений серии образцов угля разной массы (примерно до 10 мг) оценить по предложенной формуле их электрическую проводимость на СВЧ. А именно: 1) определяется добротность резонатора со спин-меткой на стенке и ампулой в центре, 2) измеряется отношение амплитуды сигнала рубина с образцом угля в тонкостенной кварцевой ампуле в центре резонатора к амплитуде сигнала рубина с пустой ампулой в резонаторе, 3) по предложенной формуле (8) определяется величина удельной СВЧ электрической проводимости образца при индукции магнитного поля, соответствующей наблюдению сигнала ЭСР рубина на стенке H_{102} -резонатора. Зависимость параметров сигнала ЭСР спин-метки от электропроводности и массы образцов каменного угля может быть использована для диагностики состояния угольного пласта при его разработке.

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Кристаллические и молекулярные структуры».

Список использованных источников

1. *Эттингер, И.Л.* Необъятные запасы и непредсказуемые катастрофы: (Твердые растворы в недрах Земли) / И.Л. Эттингер. – М.: Наука, 1988. – 175 с.
2. *Gorbaty, M.L.* Prominent frontiers of coal science: past, present and future / M.L. Gorbaty // *Fuel*. – 1994. – Vol. 73, № 12. – P. 1819–1828.
3. *Фролков, Г.Д.* Взаимосвязь выбросов угольного метана и структуры органической массы углей / Г.Д. Фролков, А.Г. Фролков // *Химия твердого топлива*. – 2011. – № 1. – 9–13.
4. *Бучаченко, А.Л.* Магнитопластичность и физика землетрясений. Можно ли предотвратить катастрофу? / А.Л. Бучаченко // *УФН*. – 2014. – Т. 184, № 1. – С. 101–108.
5. Энтропийная теория метаморфных переходов в углях / М.И. Новгородова [и др.] // *Кристаллография*. – 2000. – Т. 45, № 2. – С. 308–312.
6. *Seridonio, A.C.* Asymmetrical penetration of microwave in a conducting media and determination of microwave conductivity for very thin samples using electron spin resonance / A.C. Seridonio, L. Walmsley // *J. Phys. Chem. Solids*. – 2001. – Vol. 62, № 5. – P. 841–845.
7. A new method for contactless conductivity measurement of a semiconductor layer / V. Zevin [et al.] // *Solid State Commun.* – 1988. – Vol. 66, № 5, P. 553–555.
8. Impact of high-dielectric-loss materials on the microwave field in EPR experiments / M. Sueki [et al.] // *J. Magn. Res. A*. – 1996. – Vol. 118, № 2. – P. 173–188.
9. *Nag, B.R.* A simple microwave method for monitoring the conductivity of semiconductor epitaxial layers / B.R. Nag, G. Ghosh, S. Dhar // *Solid-State Electron.* – 1992. – Vol. 35, № 12. – P. 1823–1826.
10. Экспресс-методика бесконтактного измерения электрических параметров небольших образцов на сверхвысоких частотах / Н.А. Поклонский [и др.] // *Приборы и методы измерений*. – 2013. – № 1(6). – С. 64–71.
11. *Поклонский, Н.А.* Электронный парамагнитный резонанс перколяционных кластеров в полиэтилене / Н.А. Поклонский, Н.И. Горбачук // *Журн. прикл. спектр.* – 2001. – Т. 68, № 5. – С. 594–598.
12. Инвертирование сигнала электронного спинового резонанса каменных углей / Н.А. Поклонский [и др.] // *Журн. прикл. спектр.* – 2013. – Т. 80, № 3. – С. 379–384.
13. Способ калибровки спектрометра ЭПР: а. с. 1578610 СССР, МКИ5 G 01 N 24/10 / А.А. Мытько [и др.]; Белорусский гос. ун-т. – № 4169963; заявл. 30.12.86; опубл. 15.07.90. – Бюл. № 26.
14. *Quantitative EPR / G.R. Eaton [et al.].* – Wien: Springer, 2010. — 185 p.
15. *Пул, Ч.* Техника ЭПР-спектроскопии / Ч. Пул. – М.: Мир, 1970. – 558 с.
16. *Пул, Ч.* Справочное руководство по физике. Фундаментальные концепции, основные уравнения и формулы / Ч. Пул. – М.: Мир, 2001. – 461 с.
17. *Памятных, Е.А.* Основы электродинамики материальных сред в переменных и неоднородных полях / Е.А. Памятных, Е.А. Туров. – М.: Наука. Физматлит, 2000. – 240 с.
18. *Balanis, C.A.* Electromagnetic techniques in the development of coal-derived energy sources – a review / C.A. Balanis // *J. Microw. Power.* – 1983. – Vol. 18, № 1. – P. 45–54.
19. Complex permittivity of graphite, carbon black and coal powders in the ranges of X-band frequencies (8.2 to 12.4 GHz) and between 1 and 10 GHz / M. Hotta [et al.] // *ISIJ Int.* – 2011. – Vol. 51, № 11. – P. 1766–1772.

TECHNIQUE OF ESTIMATE OF CONDUCTIVITY OF SMALL COAL SAMPLES BY THEIR INFLUENCE ON SIGNAL OF SPIN-LABEL IN RESONATOR OF ESR SPECTROMETER

Poklonski N.A., Vyrko S.A., Poklonskaya O.N., Gorbachuk N.I., Siahlo A.I.

Belarusian State University, Minsk, Belarus
e-mail: poklonski@bsu.by

Abstract. The results of study at room temperature in the air of influences of the nonresonant absorption of microwave electromagnetic radiation by coal samples of different masses in the center of H_{102} -resonator on the electron spin resonance (ESR) signal of a standard sample (spin label) of a ruby crystal, permanently mounted on the side wall of the resonator, are presented. Quantitative evaluation of the microwave conducti-

vity of the studied coal samples based on the ESR measurements of ruby are made. Results can be applied for monitoring of electrical parameters of coals in the microwave range.

Keywords: coals; electron spin resonance; microwave conductivity.

References

1. Ettinger I.L. *Neob'yatnye zapasy i nepredskazuemye katastrofy: (Tverdye rastvory v nedrah Zemli)* [Immense reserves and unpredictable catastrophes: (solid solutions in the bowels of the Earth)]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 175 p.
2. Gorbaty M.L. Prominent frontiers of coal science: past, present and future. *Fuel*, 1994, vol. 73, no. 12, pp. 1819–1828.
3. Frolkov G.D., Frolkov A.G. Correlation between the sudden and regular releases of coal-bed methane and the structures of the organic matter of natural coals. *Solid Fuel Chemistry*, 2011, vol. 45, no. 1, pp. 9–13.
4. Buchachenko A.L. Magnetoplasticity and the physics of earthquakes. Can a catastrophe be prevented? *Phys. Usp.* 2014, vol. 57, no. 1, 92–98.
5. Novgorodova M.I., Gufan Yu.M., Losev N.F., Moshchenko I.N. Entropy theory of metamorphic transitions in coals. *Crystallography Reports*, 2000, vol. 45, no. 2, pp. 277–281.
6. Seridonio A.C., Walmsley L. Asymmetrical penetration of microwave in a conducting media and determination of microwave conductivity for very thin samples using electron spin resonance. *J. Phys. Chem. Solids*, 2001, vol. 62, no. 5, pp. 841–845.
7. Zevin V., Suss J.T., Zemel A., Rotter S. A new method for contactless conductivity measurement of a semiconductor layer. *Solid State Commun.*, 1988, vol. 66, no. 5, pp. 553–555.
8. Sueki M., Rinard G.A., Eaton S.S., Eaton G.R. Impact of high-dielectric-loss materials on the microwave field in EPR experiments. *J. Magn. Res. A*, 1996, vol. 118, no. 2, pp. 173–188.
9. Nag B.R., Ghosh G., Dhar S. A simple microwave method for monitoring the conductivity of semiconductor epitaxial layers. *Solid-State Electron.*, 1992, vol. 35, no. 12, pp. 1823–1826.
10. 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]. *Pribory i Metody Izmerenii*, 2013, no. 1(6), pp. 64–71 (in Russian).
11. Poklonskii N.A., Gorbachuk N.I. Electron paramagnetic resonance of percolation soot clusters in polyethylene. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2001, vol. 68, no. 5, pp. 776–782.
12. Poklonski N.A., Vyrko S.A., Poklonskaya O.N., Lapchuk N.M., Munkhtsetseg S. Inversion of electron spin resonance signal in coals. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2013, vol. 80, no. 3, pp. 366–371.
13. Myt'ko A.A., Papkov A.V., Penina N.M., Stel'makh V.F., Tsvirko L.V. *Sposob kalibrovki spektrometra EPR* [The way of ESR spectrometer calibration]: Patent USSR no. 1578610, 1990.
14. Eaton G.R., Eaton S.S., Barr D.P., Weber R.T. *Quantitative EPR*. Wien, Springer, 2010. 185 p.
15. Poole Ch.P., jr. *Electron Spin Resonance: A Comprehensive Treatise on Experimental Techniques*. New York, Dover Publications, 1997. 810 p.
16. Poole Ch.P., jr. *The Physics Handbook: Fundamentals and Key Equations*. New York, Wiley, 2007. 535 p.
17. Pamyatnykh E.A., Turov E.A. *Osnovy elektrodinamiki material'nyh sred v peremennyh i neodnorodnyh poljah* [Fundamentals of electrodynamics of material media in variable and inhomogeneous fields]. Moscow, Nauka. Fizmatlit Publ., 2000. 240 p.
18. Balanis C.A. Electromagnetic techniques in the development of coal-derived energy sources – a review. *J. Microwave Power.*, 1983, vol. 18, no. 1, pp. 45–54.
19. Hotta M., Hayashi M., Lanagan M.T., Agrawal D.K., Nagata K. Complex permittivity of graphite, carbon black and coal powders in the ranges of X-band frequencies (8.2 to 12.4 GHz) and between 1 and 10 GHz. *ISIJ Int.*, 2011, vol. 51, no. 11, pp. 1766–1772.

Поступила в редакцию 14.11.2014.