

05;12

Диэлектрические характеристики рудных минералов в диапазоне частот 10–40 GHz

© О.Н. Полякова, В.В. Тихонов, А.Л. Дзарданов,
Д.А. Боярский, Г.Н. Гольцман

Московский педагогический государственный университет

E-mail: ariya78@mail.ru

Институт космических исследований РАН, Москва

E-mail: vtikhonov@asp.iki.rssi.ru

Поступило в Редакцию 1 апреля 2008 г.

Рассмотрен метод исследования комплексной диэлектрической проницаемости рудных и нерудных минералов в микроволновом диапазоне. Впервые получены данные по значениям комплексной диэлектрической проницаемости следующих минералов: сфалерит, магнетит, лабрадор в диапазоне частот 10–40 GHz. Предложен метод расчета комплексной диэлектрической проницаемости из экспериментальных частотных зависимостей коэффициентов отражения и пропускания плоскопараллельной пластинки минерала. Приведены аппроксимационные выражения для расчета комплексной диэлектрической проницаемости исследуемых минералов.

PACS: 91.60.Pn

Диэлектрические характеристики многих природных минералов изучены крайне слабо [1]. Отсутствие этих данных создает проблему при моделировании взаимодействия электромагнитного излучения со многими природными средами, такими как почвы, грунты и горные породы. Это, в свою очередь, создает трудности при интерпретации данных радиометрии и радиолокации поверхности Земли и планет [2].

Помимо дистанционного зондирования, данные о диэлектрических характеристиках природных минералов могут быть полезны в таких областях, как геология, сейсмология, а также при решении задач рационального природопользования и защиты окружающей среды.

Прямых методов определения комплексной диэлектрической проницаемости не существует. Комплексная диэлектрическая проницаемость может быть определена косвенным образом по экспериментально полученным данным, таким как коэффициент отражения и пропускания [3],

тангенс угла потерь, угол Брюстера [4] и другие уже путем привлечения соответствующей теории.

Известно большое разнообразие методов и приборов для косвенного определения диэлектрической проницаемости твердых, жидких и сыпучих сред в СВЧ-диапазоне без нарушения их структуры. Это резонансные, волноводные и квазиоптические методы [5]. Каждым из этих методов исследуются в основном однородные материалы и, как правило, диэлектрики.

В работе исследовались неоднородные рудные и нерудные минералы со средним размером всех образцов $20 \times 20 \times 20$ mm. Необходимо отметить, что у данных минералов кристаллы таких размеров в природе практически не встречаются [6]. Образцы минералов не являлись мономинеральными кристаллами, а представляли собой сростки кристаллов одного минерала. Количество примесей, в основном нерудных минералов, составляло не более 10%.

В ходе работы исследовались следующие минералы: сфалерит (цинковая обманка) ZnS ($Zn-67.1$ mol.%), магнетит (магнитный железняк) (Fe_3O_4 ($Fe-72.4$ mol.%)) и типичный представитель несущей породы лабрадор — изоморфная смесь альбита $Na[AlSi_3O_8]$ и анортита $Ca[Al_2Si_2O_8]$ [7]. Магнетит, сфалерит — рудные минералы и являются основной рудой при добыче железа и цинка соответственно. Лабрадор относится к классу силикатов, группе полевых шпатов, серии плагиоклазов. Вследствие того что в лабрадоре содержится большое количество металла, он должен так же сильно поглощать электромагнитное излучение, как и рудные минералы.

Частотные зависимости коэффициента отражения по мощности $R(f)$ и коэффициента пропускания по мощности $T(f)$ плоскопараллельных пластинок минералов измерялись стандартной методикой на панорамном измерителе коэффициента стоячей волны (КСВН) и ослабления. Поскольку в работе исследовались минералы в виде куба с длиной ребра 20 mm, то для них была изготовлена измерительная ячейка под размер минерала и волноводные переходы со стандартного волновода на данную ячейку.

Из экспериментально полученных значений КСВН и ослабления по известным формулам [8] рассчитывались коэффициент отражения и коэффициент пропускания.

В эксперименте удавалось измерять значения $T(f)$ до 10^{-4} .

На рис. 1, *a, b* кружочками представлены экспериментальные значения частотных зависимостей коэффициента отражения и коэффициента

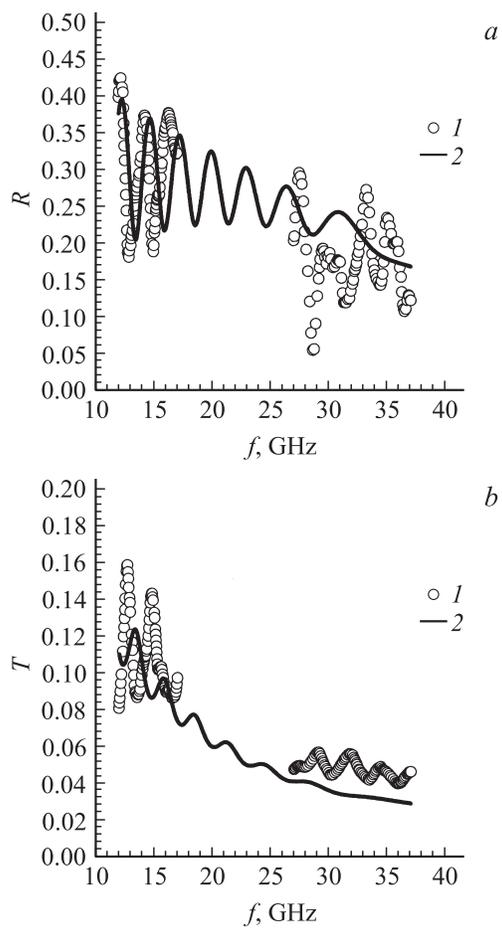


Рис. 1. Экспериментальные значения (1) и теоретический расчет (2) частотных зависимостей коэффициента отражения (а) и коэффициента пропускания (б) сфалерита.

пропускания для одного из минералов — сфалерита в диапазоне частот 10–40 GHz.

Коэффициенты отражения и пропускания образцов во всем исследуемом диапазоне имели ярко выраженную периодическую зависимость.

Средняя величина $R(f)$ варьировалась от 0.23 у лабрадора до 0.7 у магнетита. Средняя величина $T(f)$ варьировалась от $5 \cdot 10^{-3}$ у магнетита до 0.19 у лабрадора. Погрешность измерений коэффициента отражения и коэффициента пропускания на панорамном измерителе КСВН и ослабления составляла не более 5%.

Для определения действительной ε' и мнимой ε'' части комплексной диэлектрической проницаемости минералов из полученных экспериментальных значений $R(f)$ и $T(f)$ плоскопараллельных образцов была рассмотрена следующая задача.

Пусть на плоскопараллельный слой вещества, находящийся в вакууме, под углом $\theta = 0^\circ$, падает плоская электромагнитная волна с интенсивностью I_0 .

Тогда интенсивность излучения, отраженного от слоя I_R и прошедшего сквозь слой I_T , будет определяться следующими соотношениями [9]:

$$I_R = RI_0, \quad I_T = TI_0. \quad (1)$$

В свою очередь, $R(f)$ и $T(f)$ связаны с коэффициентами отражения r и пропускания t по полю следующим образом [9]:

$$R = |r|^2, \quad T = |t|^2, \quad (2)$$

$$r = \frac{r_{12} - r_{12}e^{2i\beta}}{1 - r_{12}^2e^{2i\beta}}, \quad t = \frac{(1 - r_{12}^2)e^{i\beta}}{1 - r_{12}^2e^{2i\beta}},$$

где $r_{12} = \frac{1-n}{1+n}$ — коэффициент отражения по полю от границы раздела вакуум–вещество, $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}nh$, λ — длина волны излучения, h — толщина слоя, $n = n' + in''$ — комплексный показатель преломления вещества, который можно связать с комплексной диэлектрической проницаемостью известными выражениями:

$$n' = \text{Re}(\sqrt{\varepsilon}), \quad n'' = \text{Im}(\sqrt{\varepsilon}). \quad (3)$$

Если толщина слоя удовлетворяет условию

$$\frac{h}{\lambda} \geq \frac{0.37}{n''}, \quad (4)$$

т. е. поглощение в слое значительно и слой достаточно толстый ($T \rightarrow 0$), то можно пренебречь влиянием многолучевой интерференции [10].

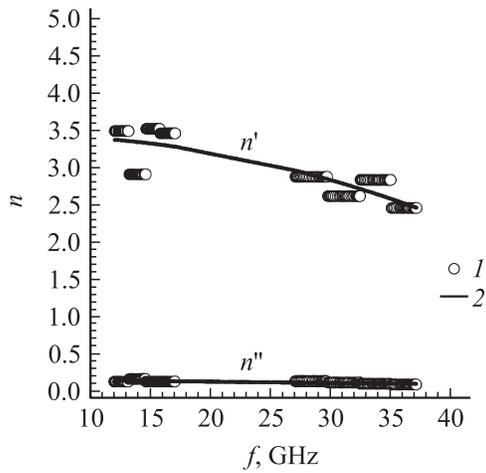


Рис. 2. 1 — частотные зависимости n' и n'' сфалерита, полученные при минимизации по формуле Розенброка; 2 — аппроксимированные частотные зависимости n' и n'' сфалерита.

Уравнения (2) в этом случае существенно упростятся: коэффициент отражения по мощности слоя будет почти равен коэффициенту отражения по мощности бесконечно толстого слоя, а коэффициент пропускания по мощности будет экспоненциально спадать с уменьшением длины волны излучения [9]:

$$R \approx |r_{12}|^2, \quad (5)$$

$$T \approx |1 - r_{12}^2|^2 e^{-4\delta n''}, \quad \text{где } \delta = \frac{2\pi}{\lambda} h.$$

Для определения n' и n'' или ϵ' и ϵ'' исследуемых минералов необходимо решить систему уравнений (2) или (5), в зависимости от экспериментальных результатов [10]. Эти системы уравнений не поддаются аналитическому решению, и их приходилось решать численно.

Значения n' и n'' минералов определялись из (2) или (5) путем минимизации целевой функции, имеющей следующий вид:

$$F(n', n'') = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \frac{(P_T(n', n'', f_k) - P_e(f_k))^2}{P_e^2(f_k)}. \quad (6)$$

Эта функция представляет собой квадрат среднеквадратичного отклонения теоретической зависимости $R(f)$ и $T(f)$ от экспериментальных в диапазоне частот Δf , в котором n' и n'' слоя можно считать постоянными (~ 1 GHz). В выражении (6): $P_T(n', n'', f_k)$ — теоретически рассчитанное из (2) или (5) значение $R(f)$ и $T(f)$, при заданных параметрах оптимизации n' , n'' на частоте излучения f_k ; $P_e(f_k)$ — усредненные экспериментальные значения $R(f)$ и $T(f)$, при той же частоте излучения; M — количество экспериментальных точек в интервале частот Δf . Для минимизации целевой функции был применен метод Розенброка [11]. Этот метод был успешно применен авторами при определении структурных параметров сухих нефтеносных песчаников [12].

Найденные значения n' и n'' были аппроксимированы гладкими функциями от частоты излучения (рис. 2), которые могут быть использованы для вычисления комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$ или комплексного коэффициента преломления $n = n' + in''$ минералов в диапазоне частот 10–40 GHz.

Ниже представлены аппроксимационные выражения для расчета n' и n'' в диапазоне частот 10–40 GHz для следующих минералов:

сфалерит:

$$\begin{aligned} n' &= 3.401400738 + 0.007632376688 \times f - 0.0008962616894 \times f^2, \\ n'' &= 0.1619177432 \times \exp(-0.01272132559 \times f), \end{aligned} \quad (7a)$$

лабрадор:

$$\begin{aligned} n' &= 3.816469517 - 0.0551132433 \times f - 0.0008430252018 \times f^2 \\ &\quad + 3.765400641 \times 10^{-5} \times f^3, \\ n'' &= 0.1372112434 \times \exp(-0.03359536575 \times f), \end{aligned} \quad (7б)$$

магнетит:

$$\begin{aligned} n' &= 7.792675767 + 0.2432845855 \times f - 0.005616219296 \times f^2, \\ n'' &= 0.3015038712 - 0.01882945266 \times f \\ &\quad + 0.0005043557748 \times f^2 - 4.736831848 \times 10^{-6} \times f^3. \end{aligned} \quad (7в)$$

В выражениях (7) f — частота излучения, выраженная в GHz. Для определения действительной и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости полученные значения n' и n'' необходимо подставить в следующие формулы:

$$\varepsilon' = n'^2 - n''^2, \quad \varepsilon'' = 2n'n'' . \quad (8)$$

Для проверки результатов полученные аппроксимационные выражения для n' и n'' минералов были использованы для расчета $R(f)$ и $T(f)$ имеющихся образцов. Результаты расчета $R(f)$ и $T(f)$ для сфалерита показаны на рис. 1, a, b — сплошная черная кривая.

Не полное совпадение теоретических частотных зависимостей коэффициента отражения и коэффициента пропускания исследуемых минералов с экспериментальными результатами объясняется тем, что у данных минералов кристаллы таких размеров в природе практически не встречаются. Образцы минералов не являлись мономинеральными кристаллами, а представляли собой сростки кристаллов одного минерала [10].

Полученные результаты показали пригодность предложенной методики для определения диэлектрических характеристик рудных и нерудных минералов.

Авторы высказывают искреннюю признательность компаниям ООО „ТЕХНОРОС“ и ООО „РАДОС“ г. Красноярска за предоставленные образцы минералов.

Список литературы

- [1] *Справочник физических констант горных пород* / Под. ред. С. Кларка. М.: Мир, 1969. 544 с.
- [2] *Яковлев О.И.* Космическая радиофизика. М.: Науч. книга, 1998. 432 с.
- [3] *Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 664 с.
- [4] *Соболев Р.Н.* Методы оптического исследования минералов: Справочник. М.: Недра, 1990. 288 с.
- [5] *Брандт А.А.* Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: Гос. изд-во физико-математической литературы, 1963. 403 с.
- [6] *Ананьев В.П., Потапов А.Д.* Основы геологии, минералогии и петрографии. М.: Высш. школа, 2005. 400 с.
- [7] *Батти Х., Принг А.* Минералогия для студентов. М.: Мир, 2001. 432 с.

- [8] *Лебедев И.В.* Техника и приборы сверхвысоких частот. Т. 1. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. 512 с.
- [9] *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
- [10] *Полякова О.Н., Тихонов В.В., Мельников А.П., Боярский Д.А.* // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 2. № 4. С. 147–155.
- [11] *Химмельблау Д.М.* Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 534 с.
- [12] *Боярский Д.А., Гершензон В.Е., Гершензон Е.М., Гольцман Г.Н., Птицина Н.Г., Тихонов В.В., Чулкова Г.М.* // Радиотехника и электроника. 1996. Т. 41. № 4. С. 441–447.