

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В НАВОДОРОЖЕННОМ ТИТАНЕ VT1-0 ПРИ  
РАСПРОСТРАНЕНИИ В НЕМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

Сюй Шупэн

Научный руководитель: профессор В.В. Ларионов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: 1208502516@qq.com

DIELECTRIC LOSSES IN HYDROGENATED VT1-0 TITANIUM IN DISTRIBUTION IN EDDY  
CURRENT

Xu Shupeng

Scientific Supervisor: Prof., Dr. V.V. Larionov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Lenin str., 30, 634050

E-mail: 1208502516@qq.com

**Abstract.** For the first time introduced the concept of the value of the dielectric loss in the hydrogenated titanium. Measurement of this value allowing more sensitive measurement of the distribution of hydrogen in the titanium sample according to the depth. This concept is widely used in the analysis of the plasma properties of semiconductors and other materials.

**Введение.** Целью данной работы является исследование применения величины диэлектрических потерь для целей диагностики состояния водорода в титане. По определению тангенс угла диэлектрических потерь равен  $\operatorname{tg}\delta = j_a/j_r$ , где  $j_a$  – плотность активного тока,  $j_r$  – плотность реактивного тока. В слабых электрических полях, которые реализуются в магнитном спектрометре ЗМА, плотность тока можно вычислить, используя закон Ома в дифференциальной форме,  $j_a = \sigma E$ , где  $\sigma$  – проводимость титанового образца,  $E$  – напряженность электрического поля. Образец из титана представляет собой плоскую пластину площадью  $S$  и длиной  $d$  (модель конденсатора емкостью  $C$ ), в котором распространяется вихревой ток. Поэтому

$$j_r = I_r / S = \omega CU / S = \omega \varepsilon_0 \varepsilon E \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная,  $\omega$  – циклическая частота вихревого тока,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала. Тогда тангенс угла диэлектрических потерь равен

$$j_r = j_a / j_r = \sigma / \omega \varepsilon_0 \varepsilon \quad (2)$$

**Материалы и методы.** Наводороживание осуществлялось по методу Сивертса [1,2]. После насыщения были проведены измерения концентрации водорода при помощи анализатора водорода RHEN602 фирмы LECO. Послойное измерение содержания водорода проведено на магнитном спектральном анализаторе (МСА) с применением методов чувствительности, предложенными авторами в работе [3-4]. Измерение сопротивления образцов титана на постоянном токе проводили с использованием программно-измерительного комплекса «KEINLEY INSTRUMENTS».

**Результаты и обсуждение.** Диэлектрические потери в исследуемом материале связаны с особенностями структуры титанового сплава в наводороженном состоянии. В веществах с плотной упаковкой атомов в присутствии примесей (рис. 1), дефектов, дислокаций, искажающих решетку,

диэлектрические потери возрастают. Обычно потери связывают с явлением поляризации и изменением электропроводности. Здесь могут быть заметны потери от электропроводности. На это указывает измерения электропроводности в работе [3]. При этом как показывает экспериментальные данные, примеси даже в малом количестве резко увеличивают диэлектрические потери. Так в диапазоне частот от 10 до 10<sup>4</sup> герц тангенс угла диэлектрических потерь изменяется на три порядка. Для исследованных концентраций водорода в титане характерны две ветви для зависимости  $\text{tg}\delta$ , возрастающая и ниспадающая. Потери, возрастающие с увеличением частоты, и потери заметно возрастающие с увеличением температуры, когда  $\text{tg}\delta$  уменьшается с увеличением частоты. Такая зависимость в литературных источниках приписывается дипольному характеру структуры материала. Потери первого вида объясняются релаксационной поляризацией. Они, например, сильно выражены в веществах с ионной структурой (рис. 1). Чистые вещества обладают небольшими релаксационными потерями. Введение примесей приводит к возрастанию диэлектрических потерь вследствие нарушения структуры титанового сплава [6].

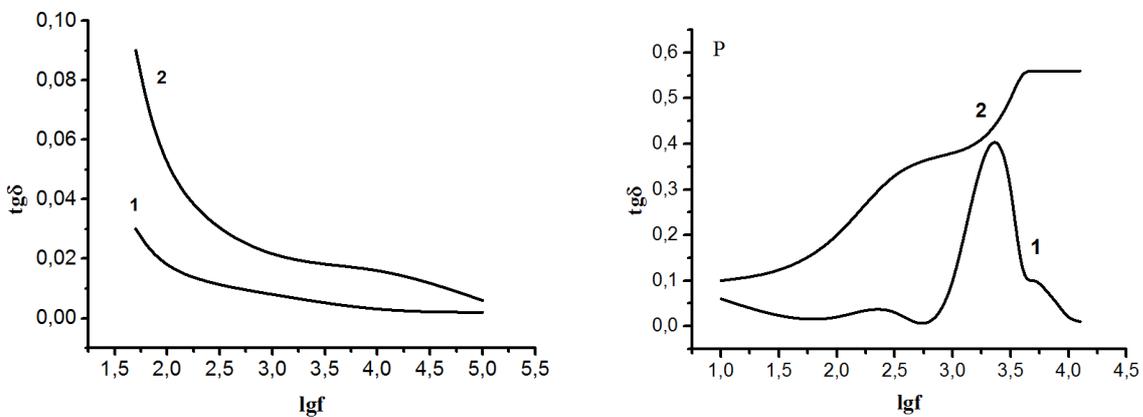


Рис. 1. Пример зависимости  $\text{tg}\delta$  от частоты для NaCl (1- без примесей, 2 – с примесями)

Рис. 2. Пример зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от частоты для веществ с дипольным строением

Причины большого различия в диэлектрических потерях объясняются тем, что электронная поляризация в диэлектриках устанавливается за различные времена.

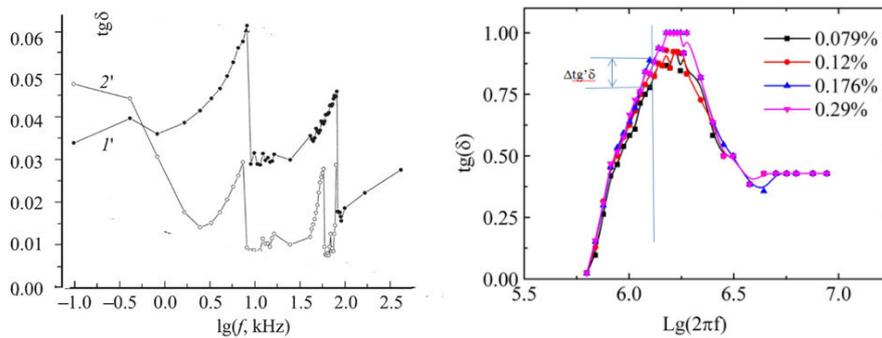


Рис.3 (слева). Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь для пленки  $\text{Ta}_x\text{O}_y$  на подложке GaAs без обработки (1') и после обработки в плазме кислорода (2') [7].

Рис.4. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь для наводороженного титана

Коэффициент потерь меняется с изменением частоты, содержания примесей (рис.1), температуры и влажности. Содержание добавок в композиционных материалах сопровождается большими значениями  $\text{tg } \delta$  (рис.2). Частотная зависимость потерь является характеристикой материала и определяется для каждого материала не только свойствами молекул материала, но и наличием и составом примесей. Как правило, потери имеют максимум при одной или нескольких частотах, в зависимости от типа молекул (см. рис. 3, 4). Положение максимумов характеризуется собственными частотами установления поляризации. Они могут быть связаны с поворотом полярных молекул в жидком диэлектрике или с поворотом домена в сегнетоэлектрике. Исследование частотного поведения потерь (диэлектрическая спектроскопия) позволяет изучать структуру веществ.

Как следует из рисунка 3 наблюдается несколько ветвей зависимости  $\text{tg } \delta$  от частоты вихревого тока. На рис. 4 величина изменения тангенса на одной и той же частоте позволяет определять концентрацию одорода в титане на различных глубинах образца.

**Выводы. Заключение.** Основной вклад в потери вносят процессы проводимости и установления поляризации. Проводимость определяет потери под действием постоянного напряжения и, в меньшей степени, при низких частотах. По мере повышения частоты возрастает роль поляризационных потерь. Поляризация устанавливается не мгновенно, а в течение некоторого времени, зависящего от типа поляризации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Larionov, V.V., Lider, A.M., Krasnov, D.N. (2014). Measurement Techniques Measurements of the Laminar Concentration of Hydrogen in Titanium Using Eddy Currents of Different Frequency. Measurement Techniques 57, no 5, pp. 564–568.
2. Ларионов В.В., Лисичко Е.В., Лидер А.М. Исследование модификации свойств наводороженных металлов вихретоковым методом // Вестник Челябинского государственного педагогического университета. – 2012. – № 6. – С. 268–276.
3. Larionov, V.V., Lider, A.M., Sednev, D.A., Xu, S. Compulsory Checking of Nuclear Power Engineering Materials by Direct and Eddy Current. (2016). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 142 (1), 012032.
4. Чжу И., Сюй Ш., Ларионов В.В. Исследование диффузии водорода в титане ВТ1-0 вихревыми токами // В сборнике: Перспективы развития фундаментальных наук. Сборник научных трудов XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 7 томах. –2016. – С. 313–315.
5. Ларионов В.В., Лидер А.М. Влияние водорода на проводимость титана в условиях облучения электронами // Известия высших учебных заведений. – Физика. – 2014. – Т. 57. № 11-2. – С. 124–128.
6. Лидер А.М., Ларионов В.В., Гаранин Г.В. Ультразвуковой метод определения водородного охрупчивания титановых сплавов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – Т. 80.– № 10. – С. 43–46.
7. Калыгина В.М., Зарубин А.Н., Новиков В.А., Петрова Ю.С., Скакунов М.С., Толбанов О.П., Тяжев А.В., Яскевич Т.М. Влияние кислородной плазмы на свойства пленок оксида тантала // ФТП. – 2010. – Т. 44. – вып.9. – С. 1266–1273.