ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ КАК ХАРАКТЕРИСТИКА РЕЛАКСАЦИОННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Куропаткина С.А., Богатина В.Н., Богатин А.С.
Физический факультет Южного Федерального университета
Ростов-на-Дону, Россия

Релаксационные процессы проявляют себя в постоянных электрических полях в виде спадания тока со временем, которое в первом приближении экспоненциально. При изучении процессов релаксационной поляризации в постоянных полях в величину спадающего со временем тока дают вклад все медленные поляризации, что весьма затрудняет их исследование. Поэтому чаще при изучении процессов релаксационной поляризации выбирается метод переменных полей, что позволяет изучать релаксационные процессы в различных частотных областях их проявления. Каждая поляризация, развивающаяся в диэлектрике, характеризуется своим временем релаксации t (или набором времен). Время релаксации – единственный макропараметр, который может быть получен непосредственно из эксперимента. Основной характеристикой всякого диэлектрика является диэлектрическая проницаемость e. В переменном поле это величина комплексная $e^* = e' - je''$. Величина e' выражает диэлектрическую проницаемость в обычном общепринятом смысле $e' = 1 + a$, где a - поляризуемость диэлектрика. e'' - мнимая часть диэлектрической проницаемости. e'' связанная с действительной частью тока, текущего через диэлектрик, причем в состав действительной части тока входит не только ток сквозной проводимости, но и действительная часть тока за счет процесса поляризации. e' и e'' являются существенно важными для описания поляризационных явлений в диэлектриках. Наряду с ними часто используется такая характеристика как тангенс угла диэлектрических потерь $tgd = {e''}/{e'}$. Участки частотной зависимости e', где она уменьшается с ростом частоты, называют областью дисперсии e'. Физически области дисперсии e' соответствуют такие состояния в образце диэлектрика, когда поляризационные заряды не успевают следовать за приложенным электрическим полем. Вклад отстающих от поля релаксаторов в общую поляризацию диэлектрика становится меньше. Это и приводит к снижению e'. На частотной зависимости e' может наблюдаться несколько таких спадов (ступенек), каждый из которых соответствует «отключению» очередного механизма поляризации.

Наряду с комплексной диэлектрической проницаемостью и тангенсом угла диэлектрических потерь релаксационную поляризацию можно описывать и с помощью комплексной удельной проводимости

$$s^* = s' - js'' = \frac{w^2 \Delta e t e_0}{1 + w^2 t^2} - j(we_0 e_\infty + \frac{we_0 \Delta e}{1 + w^2 t^2}) \qquad (1)$$

Принято считать, что s' в частотной области выше ${1}/{t}$ имеет насыщение, а s'' характеризуется экстремумами в ее частотной зависимости (максимумом и минимумом). Однако при изменении соотношения $\frac{\Delta e}{e_\infty}$ характер $s''(w)$ меняется. С уменьшением $\frac{\Delta e}{e_\infty}$ высоты максимума уменьшаются, а при некоторых отношениях $\frac{\Delta e}{e_\infty}$ он и вовсе исчезает.

В самом деле, с учетом уравнения Дебая

$$s'' = we_0 e_\infty + \frac{we_0 \Delta e}{1 + w^2 t^2} \qquad (2),$$

Экстремумы этой функции находятся из уравнения

$$w^4 t^4 + w^2 t^2 (2 - \frac{\Delta e}{e_\infty}) + (1 + \frac{\Delta e}{e_\infty}) = 0 \qquad (3)$$

Корни уравнения действительны, пока дискриминант D положителен. При D=0 максимумы и минимумы функции сливаются, возникает точка перегиба.

$$D = t^4 ((\frac{\Delta e}{e_\infty} - 2)^2 - 4(1 + \frac{\Delta e}{e_\infty})) = 0 \qquad (4)$$

Равенство нулю дискриминанта имеет место при $\frac{\Delta e}{e_\infty} = 8$, а при $\Delta e < 8e_\infty$ экстремумы этой функции отсутствуют. Это обстоятельство и соображения, которые были приведены нами в /1/, позволяют выделить две области соотношения вклада в поляризацию образца диэлектрика быстрых и медленных процессов – при $\Delta e < 8e_\infty$ релаксационный процесс можно условно назвать «слабым», а при $\Delta e > 8e_\infty$ - «сильным». Для сильного процесса экстремумы в зависимости $s''(w)$ имеются, для слабого – нет.

Для образцов с сильным релаксационным процессом наличие процесса релаксационной поляризации может быть обнаружено по зависимостям $s''(s')$. Подобно тому, как в диаграмме Коула-Коула в зависимостях $e''(e')$ имеются максимумы, в зависимостях они $s''(s')$ тоже присутствуют .

По исследованию частотных зависимостей $s''(w)$ при разных температурах могут быть определены энергии активации дебаевского релаксационного процесса. С учетом уравнения Дебая

$$s'' = e_\infty e_0 w + \frac{\Delta e e_0 w}{1 + w^2 t_0^2 e^{2U/kT}} \qquad (5)$$

в частотной зависимости s'' имеют место экстремумы, описываемые уравнением

$$w^4 t_0^4 e^{4U/kT} + w^2 t_0^2 e^{2U/kT} (2 - \frac{\Delta e}{e_\infty}) + (1 + \frac{\Delta e}{e_\infty}) = 0 \qquad (6)$$

Уравнение является биквадратным. Меньший положительный корень соответствует максимуму, а больший – минимуму в зависимости $s''(w)$. Разумеется, уравнение будет иметь действительные корни только в случае развития сильного релаксационного процесса. Положим $\Delta e / e_\infty = 9$, в этом случае уравнение существенно упрощается, и определим частоты экстремума. В этом случае для максимума частота $w_{\max} = \frac{2}{t_0 e^{U/kT}}$, а для минимума $w_{\min} = \frac{\sqrt{10}}{t_0 e^{U/kT}}$. Таким образом, как и в случае исследования экстремумов $tgd(w)$ и $e''(w)$, максимумы и минимумы $s''(w)$ дают линейную зависимость $\ln w(1/T)$, и по наклону прямой $\ln w(1/T)$ может быть определена энергия активации процесса.

В температурной зависимости s'' максимумы отсутствуют.

Таким образом, энергия активации процесса релаксационной поляризации может быть определена при исследованиях частотных и температурных зависимостей e'' и tgd, и частотных зависимостей s''.

1.А.С.Богатин, И.В.Лисица,С.А.Богатина. Письма в ЖТФ,том 28, вып.18, с.61-66.