

08; 09

© 1992

ВОЗБУЖДЕНИЕ СВЧ-ТОКА ДЕБАЯ
В ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНОМ ЭЛЕКТРОЛИТЕ

Г.А. Л я х о в, Ю.П. С в и р к о

Для использования нелинейно-оптических методик, открывающих новые возможности в изучении кинетических явлений в жидких растворах [1] или в ионизированных газах [2], перспективными объектами исследования представляются слабые электролиты, к которым можно отнести большинство водных растворов. Содержательные физические исследования могут обращаться к ионам на примесях и газовых пузырьках, комплексам из молекул воды с конечным временем жизни, переносу заряда по нестационарным цепочкам водородных связей. Принципиальна здесь возможность пространственного разделения зарядов разных знаков и возбуждения электромагнитного поля с частотой, определяемой пространственным масштабом колебаний концентрации ионов. Один из механизмов пространственного разделения зарядов в электролите с преобразованием акустической энергии в электрическую [3], предложенный Дебаем, действует в продольной акустической волне, если различны коэффициенты трения анионов и катионов. Колебания разноименных ионов при этом имеют разные амплитуды, это ведет к возникновению дипольного момента на акустической частоте. В электролите возбуждается электромагнитное поле, напряженность которого определяется амплитудой звуковой волны и подвижностями ионов. Этот эффект был зарегистрирован [4] на килогерцовых частотах в водном растворе $NaCl$. Напряженность электромагнитного поля здесь невелика, что естественно связано с недостаточной мощностью акустических источников в этом диапазоне и с большой (~ 10 - 100 м) длиной электромагнитной волны. Это ограничивает использование эффекта для определения параметров электролита.

В диапазоне более высоких частот эффективным акустическим источником может служить Мандельштам-Бриллюэновская (МБ) схема оптической генерации гиперзвука в электролите; эффект Дебая должен приводить здесь к возбуждению электрического СВЧ-тока во всем объеме взаимодействия световых волн. Возможность получения высокой интенсивности гиперзвуковой волны здесь делает реальным измерение кинетических параметров электролита.

Преобразование энергии оптического возбуждения в электрическую описывает система уравнений, которая включает линеаризованные относительно плотности ρ и колебательной скорости частиц жидкости $\nu = \{\nu, 0, 0\}$, уравнения неразрывности и баланса импульса [5]:

$$\rho_{\pm} + \rho_0 v_x = 0, \quad (1)$$

$$\rho_0 v_{\pm} + \mu^2 \rho_x = \eta v_{xx} + \rho_0 (\partial \epsilon / \partial \rho) (E^2)_x / 8\pi; \quad (2)$$

уравнения движения ионов [6]:

$$m_{\pm} (v_{\pm})_t + \alpha_{\pm} v_{\pm} = -m_{\pm} v_{\pm}. \quad (3)$$

Здесь ρ_0 и η — плотность и коэффициент вязкости электролита, μ — скорость звука, m_{\pm} , α_{\pm} и v_{\pm} — массы, коэффициенты трения и скорости относительного движения катионов и анионов, E — напряженность электрического поля световой волны, ϵ — диэлектрическая проницаемость электролита. Индексы „ t ” и „ x ” отмечают дифференцирование по времени и координате.

Считаем, что в жидкости параллельно оси „ x ” распространяются две встречные световые волны, частоты которых отличаются на величину МБ-сдвига $\Omega = 2k\mu$ (k — волновой вектор световой волны) [7]:

$$E = E_p \exp[i\omega t - ikx] + E_s \exp[i(\omega - \Omega)t + ikx] + \text{к.с.}$$

Лазерная накачка возбуждает в электролите гиперзвуковую волну с частотой Ω и волновым вектором $2k$, колебательная скорость частиц жидкости изменяется по закону $v = W \exp[i\Omega t - 2ikx] + \text{к.с.}$, причем из (1), (2) следует

$$W = -i [\rho_0 (\partial \epsilon / \partial \rho) / 16 \pi \eta k] E_p E_s^*. \quad (4)$$

Плотность тока $j = en(v_+ - v_-)$ на частоте гиперзвука при концентрации n электролита равна, как следует из (3),

$$j(\Omega) = i\Omega en W [(v_+ + i\Omega)^{-1} - (v_- + i\Omega)^{-1}]. \quad (5)$$

Здесь $v_{\pm} = \alpha_{\pm} / m_{\pm}$ — обратные времена затухания колебаний ионов. Коэффициенты трения можно оценить как $\alpha_{\pm} = 6\pi\eta R_{\pm}$, где R_{\pm} — радиусы ионов; для водного раствора NaCl имеем $v_{\pm} \approx \approx 10^{13} \text{ с}^{-1}$, $v_+ - v_- \approx 10^{12} \text{ с}^{-1}$ [4, 6]. Таким образом, в оптическом диапазоне ($k \approx 10^5 \text{ см}^{-1}$) частота гиперзвука $\Omega \approx \approx 10^{10} \text{ с}^{-1} \ll v_{\pm}$, поэтому плотность СВЧ-тока в электролите:

$$j(\Omega) = [en\mu\rho_0 (\partial \epsilon / \partial \rho) / 8\pi\eta] (v_+^{-1} - v_-^{-1}) E_p E_s^*. \quad (6)$$

Для оценки величины рассматриваемого оптоэлектрического эффекта воспользуемся параметрами водного раствора NaCl [6]. В этом случае при $\rho_0 (\partial \epsilon / \partial \rho) \approx 2$ [7], $\eta \approx 10^{-2}$ п, $v_+^{-1} - v_-^{-1} \approx \approx 10^{14}$ плотность тока (6) равна

$$j [\text{А/см}^2] \approx 10^{-29} n [\text{см}^{-3}] \{ \rho_p [\text{Вт/см}^2] \rho_s [\text{Вт/см}^2] \}^{1/2}, \quad (7)$$

где $P_{p,s} = c |E_{p,s}|^2 / 8 \pi$ - плотности мощности встречных световых волн. Таким образом, при $P_{p,s} \approx 10$ МВт/см² (типичное значение для лазеров с модуляцией добротности) полный ток через сечение лазерного пучка при $n \approx 10^{17}$ см⁻³ (т.е. для электролита с концентрацией ионов около 1%) составит 10 мкА. Это допускает регистрацию сигнала с помощью стробоскопического осциллографа с временным разрешением 10^{-9} - 10^{-8} с. Существенно, что для заданной концентрации уравнение (6) дает прямую связь между плотностью тока и разностью $v_+^{-1} - v_-^{-1}$, которая характеризует подвижность ионов.

Если носителем одного из ионов выступает массивное образование, например комплекс из молекул растворителя [1], эффективная величина коэффициента затухания, для определенности v_+ уменьшается в отношении $R_+ / m_+ \sim N_c^{-2/3}$, где N_c - число молекул в комплексе. Для предполагаемого значения $N_c > 10^3$ [1] соответствующий выигрыш составляет два порядка, поэтому, если принять пределом чувствительности схеммы по току 1 мкА, вклад комплексов в рассматриваемый эффект наблюдаем при их концентрации $\sim 10^{14}$ см⁻³.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] B u n k i n F.V., L y a k h o v G.A., S v i r k o Yu.P., S h i p i l o v K.F. // Opt. & Acoust. Rev. 1990. V. 1. N 2. P. 155-160.
- [2] Б о я р ч у к К.А., К у л е ш о в Ю.П., Л я х о в Г.А., С в и р к о Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 8. С. 5-8.
- [3] D e b y e P. // J. Chem. Phys. 1933. V. 1. N 1. P. 13-20.
- [4] М а л а х о в А.Н., Ч е р е п е н н и к о в В.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1984. Т. 27. В. 4. С. 1349-1351.
- [5] Л а н д а у Л.Д., Л и ф ш и ц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 733 с.
- [6] В и р о в л я н с к и й А.Л., М а л а х о в А.Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 1981. Т. 24. В. 3. С. 851-859.
- [7] С т а р у н о в В.С., Ф а б е л и н с к и й И.Л. // УФН. 1969. Т. 98. В. 3. С. 441-496.

Поступило в Редакцию
11 ноября 1991 г.