

УДК 537.528

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ВОДЕ С ПРИЭЛЕКТРОДНЫМИ ПРОВОДЯЩИМИ СЛОЯМИ

© 2010 г. С. М. Коробейников, А. В. Мелехов, В. Г. Посух

Представлено академиком В.П. Смирновым 18.03.2010 г.

Поступило 06.04.2010 г.

Проблема увеличения импульсной электрической прочности воды актуальна для создания емкостных накопителей энергии [1]. Повышенные значения электропрочности воды ранее достигались уменьшением напряженности поля вблизи электродов [2]. Реализовывалось это различными способами: инъекцией зарядов материалами электродов, введением биполярных ионов аминокислот, созданием приэлектродных слоев путем пропускания постоянного тока, созданием диффузионных ионных слоев вблизи поверхности электродов. Однако до сих пор не предложено технологического варианта, который может быть использован в реальных накопителях.

Модифицирование электродов с целью создания повышенной электропроводности вблизи поверхности представляется перспективным для использования в высоковольтной технике. Целью настоящей работы является оценка эффективности увеличения напряженности поля в промежутке с модифицированными электродами.

Эксперименты проводили на импульсах напряжения длительностью 1.5–2 мкс с характерным временем нарастания $\tau_{\text{ф}} \approx 0.6$ мкс, спада ~ 0.1 мкс и амплитудой U до 200 кВ. Использовалась ячейка из нержавеющей стали с полусферическими электродами диаметром 35–50 мм и зазором между ними $d = 3$ –5 мм. Деионизованная вода с удельной проводимостью $\sigma \approx 10^{-7}$ (Ом · см) $^{-1}$ поступала в ячейку из замкнутого контура очистки воды.

Пространственные керрограммы получали с помощью лазера ИПЛЭН с длиной волны $\lambda = 0.61$ мкм и длительностью импульса 3 нс. Для регистрации напряженности электрического поля в центре промежутка применялся He–Ne-ла-

зер (0.63 мкм). Его луч диаметром ~ 0.3 мм проходил через центр ячейки под углом 45° относительно луча импульсного лазера. Регистрация набега фаз осуществлялась фотоумножителем ФЭУ-84.

В используемой схеме скрещенных поляризаторов соотношение интенсивности излучения $\frac{I}{I_0}$ на выходе из ячейки записывается в виде

$$\frac{I}{I_0} = \sin^2 \varphi = \sin^2 \left(\pi B_K \int_{\ell} E_z^2(x) dx \right), \quad (1)$$

где B_K – постоянная Керра, $E_z(x)$ – компонента электрического поля, перпендикулярная лазерному лучу, x – направление зондирующего луча. В работе [3] приведены результаты калибровки данной системы регистрации на металлических электродах аналогичного размера. Набег фаз $\varphi = \frac{\pi}{2}$ регистрировался при средней напряженности поля $E = 360$ кВ/см.

На рисунке 1 показаны фрагменты пространственных керрограмм в максимуме напряжения для металлических и модифицированных электродов.

Серия замкнутых темных полос в промежутке с диффузионными электродами свидетельствует о значительном пространственном усилении напряженности электрического поля в средней части промежутка.

По динамике набега фаз, регистрируемого ФЭУ, было замечено, что на стадии нарастания напряжения (до 0.3 мкс) значения средней и локальной напряженности поля близки. В максимуме напряжения ($t = 1.5$ мкс) локальная напряженность поля $E_{\text{л}}$ в центре возрастала, достигая более ~ 880 кВ/см.

Напряженность электрического поля у поверхности $E_{\text{с}}(t)$ можно оценить из выражения,

Новосибирский государственный технический университет

Институт лазерной физики

Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск

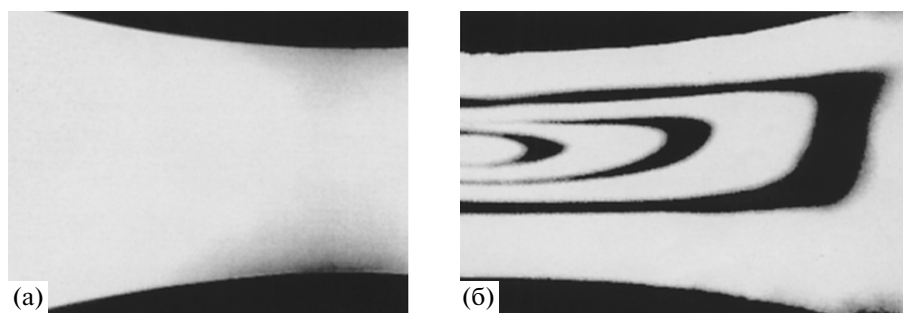


Рис. 1. Фрагменты типичных керрограмм в максимуме напряжения ($E \approx \frac{U}{d} \approx 420$ кВ/см): а – металлические электроды, б – модифицированные электроды. Набег фаз, равный π , соответствует локальной напряженности $E_{\text{л}} \approx 510$ кВ/см, 2π – 720 кВ/см, 3π – 880 кВ/см.

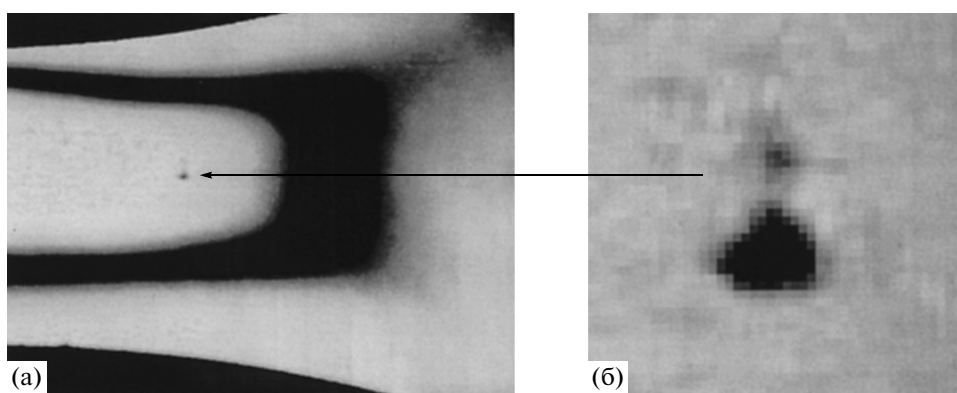


Рис. 2. Панорамная керрограмма начальных ионизационных процессов в объеме промежутка ($E = \frac{U}{d} \approx 440$ кВ/см): а – общий вид; б – увеличенный фрагмент. Анод – сверху.

полученного для “диффузионных” электродов [4]:

$$E_s(t) \approx \frac{U}{d} \left(\frac{\tau}{\tau_p} - 1 \right)^{-1} \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right) \right], \quad (2)$$

где τ – характерное время нарастания напряжения, $\tau_p \approx \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\sigma}$ – характерное время вытеснения поля

для слоя с проводимостью σ . Можно показать, что согласно (2) для используемого импульса напряжения приэлектродная напряженность сначала увеличивается почти пропорционально напряжению до $E_s \approx 200$ кВ/см, затем падает до $E_s \approx 20$ кВ/см.

Усиленная напряженность электрического поля в центральной части промежутка и ослабленная на поверхности электродов в ряде случаев способствует развитию начальных ионизационных процессов в объеме [4]. Инициаторами таких процессов могут быть микрочастицы, находящиеся в межэлектродном промежутке.

Рисунок 2 – фотография, полученная за несколько десятков наносекунд до среза импульса

напряжения. Характерная оптическая неоднородность свидетельствует о зарождении начальных ионизационных процессов. Оценка по набегу фаз дает значение напряженности поля в центральной части $E_{\text{л}} = 620$ кВ/см. Диаметр перетяжки оптической неоднородности не превышает 20 мкм. Характерная длина неоднородности от перетяжки по направлению к катоду составляет 220–240 мкм, а к аноду 100–120 мкм. На наш взгляд, здесь впервые зарегистрирована структура развития ионизационных процессов в объеме промежутка.

Таким образом, электрооптическим методом проведены измерения пространственно-временного распределения напряженности электрического поля модифицированных электродов в воде. “Диффузионные” электроды, создающие усиление напряженности электрического поля в объеме межэлектродного промежутка, могут быть использованы для исследования физических процессов безэлектродного инициирования разряда.

Полученные физические результаты дают основание для применения модифицированных

электродов в импульсных накопителях энергии, что позволит увеличить плотность запасаемой энергии и предельную мощность накопителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов А.И. // ПТЭ. 2005. № 2. С. 9–38.
2. Ушаков В.Я., Климкин В.Ф., Коробейников С.М., Лопатин В.В. Пробой жидкостей при импульсном напряжении. Томск: НТЛ, 2005. 488 с.
3. Korobeynikov S.M., Melekhov A.V., Posukh V.G. et al. // IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul. 2009. V. 16. № 2. P. 504–508.
4. Воробьев В.В., Капитонов В.А., Кругляков Э.П., Цидулко Ю.А. // ЖТФ. 1980. Т. 50. № 5. С. 993–999.