

- [1] *Кашерининов П.Г., Кичаев А.В., Ярошецкий И.Д.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 17. С. 48–53.
- [2] *Аркадьева Е.Н., Матвеев О.А., Маслова Л.В. и др.* // ДАН СССР. 1975. Т. 221. С. 77.
- [3] *Agrinskaia N.V., Arkadeva E.N.* // Phys. Stat. Sol. (b). 1987. Vol. 143. P. K103–K105.
- [4] *Кашерининов П.Г., Кичаев А.В., Томасов А.А., Ярошецкий И.Д.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 18. С. 16.
- [5] *Кашерининов П.Г., Кичаев А.В., Перепелицын Ю.Н. и др.* / Препринт ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. № 1569. С.-Пб., 1991. 58 с.
- [6] *Green M.A., Shewchun J.* // Sol. St. Electron. 1974. Vol. 17. P. 349–365.
- [7] *Green M.A., Temple V.A.K., Shewchun J.* // Sol. St. Electron. 1975. Vol. 18. P. 745.
- [8] *Малахов Б.А., Покалякин В.М., Степанов Г.В.* // Микроэлектроника. 1980. Вып. 9. С. 132.
- [9] *Вуль А.Я., Федорова В.И., Бирюлин Ю.Ф. и др.* // ФТП. 1981. Т. 15. С. 525.
- [10] *Вуль А.Я., Козырев С.В., Федоров В.И.* // ФТП. 1981. Т. 15. С. 142.

01;12
© 1995 г.

Журнал технической физики, т. 65, в. 9, 1995

О ВЛИЯНИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ НА РАВНОВЕСИЕ ШАРА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В.В.Бережнов, В.А.Семенов

Пермский государственный университет, Пермь, Россия
(Поступило в Редакцию 20 июля 1994 г.)

Введение

В работах [1–3] экспериментально и теоретически показана возможность и определены основные условия реализации электростатического подвеса в жидком диэлектрике без динамического управления потенциалами электродов. При этом для уменьшения влияния проводимости жидкости подвес осуществлен в низкочастотном переменном электрическом поле. В настоящей работе представлены результаты исследования равновесия тела в постоянном электрическом поле при протекании электрического тока. В этом случае появляются дополнительные условия равновесия, поскольку электрическая сила, действующая на тело, обусловлена взаимодействием с полем не только поляризационных, но и свободных зарядов, возникающих на его поверхности.

Теория

Рассмотрим равновесие диэлектрического шара, погруженного в слабопроводящую изолирующую жидкость, вблизи отверстия, высверленного в пластине горизонтального плоского конденсатора, подключенного к источнику постоянного высокого напряжения (рис. 1). На шар действуют электрическая F_1 и гравитационная F_2 силы, которые при определенных значениях параметров могут уравновесить друг друга. Найдем условия этого равновесия.

При протекании тока электрическая сила F_1 вызвана взаимодействием возникающих на поверхности шара поляризационных и свободных зарядов с электрическим полем [4]

$$F_1 = \oint \left[\tau E_m + \frac{\varepsilon_1}{4\pi} \left(E(En) - \frac{1}{2} E^2 n \right) \right] ds,$$

$$4\pi\tau = \varepsilon_1 E_{n1} - \varepsilon_2 E_{n2}, \quad E_{nm} = E_{n1} - \frac{2\pi}{\varepsilon_1} \tau, \quad (1)$$

где τ — свободный поверхностный заряд; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — соответственно диэлектрическая проницаемость жидкости и шара; n — единичный орт внешней нормали к элементу поверхности ds шара; E_m — напряженность поля в отсутствие шара; E_{n1}, E_{n2} — нормальные компоненты напряженности на поверхности соответственно в жидкости и в шаре.

Совместим начало сферической системы координат (r, θ, φ) с центром отверстия. Угол θ отсчитывается от полярной оси z , направленной вверх перпендикулярно плоскости пластин. Допустим, что радиус шара R очень мал по сравнению с радиусом отверстия a и расстоянием между пластинами конденсатора. В этом случае для определения поля вблизи шара используем метод сращиваемых асимптотических разложений [5], поскольку на расстояниях, больших по сравнению с радиусом шара, его влиянием на поле электродов можно пренебречь. Потенциалы u_1 в среде и u_2 в шаре удовлетворяют следующей системе уравнений

$$\begin{aligned} \Delta u_1 &= 0, & \Delta u_2 &= 0, \\ r = R: & \quad u_1 = u_2, & \sigma \frac{\partial u_1}{\partial n} - \sigma \frac{\partial u_2}{\partial n} &= \sigma_s \Delta_s u_1, \\ r \rightarrow \infty: & \quad u_1 = u_0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь σ_1, σ_2 — соответственно проводимости жидкости и шара; σ_s — поверхностная проводимость [6]; Δ_s — поверхностный лапласиан;

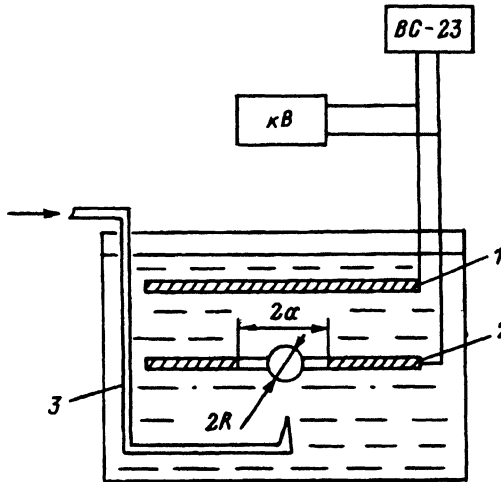


Рис. 1.

U — напряжение между электродами; u_0 — потенциал поля электродов в отсутствие шара, представленный в виде ряда по степеням r ,

$$u_0 = U \sum_{n=0}^{\infty} Q_n (r/a)^n P_n(\cos \theta),$$

$P_n(\cos \theta)$ — полиномы Лежандра.

Решая систему (2), вычислим по формулам (1) электрическую силу, действующую на шар в центре отверстия,

$$F_z = -\frac{1}{2} \varepsilon_1 U^2 \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ 1 - \sigma + (n+1)\sigma'_s + \frac{(\varepsilon - \sigma)[(n+1)(\varepsilon + \sigma) + 1] + \sigma'_s(n+1)[(2n+3)\sigma - (n+1)(n+2)\sigma'_s]}{n+2 + (n+1)\sigma - (n+1)(n+2)\sigma'_s} \right\} \times \\ \times \frac{n(n+1)}{n+1 + n\sigma - n(n+1)\sigma'_s} (R/a)^{2n+1} Q_n Q_{n+1}, \\ \varepsilon = \varepsilon_2/\varepsilon_1, \quad \sigma = \sigma_2/\sigma_1, \quad \sigma'_s = \sigma_s/(\sigma_1 R). \quad (3)$$

Ввиду малости шара ($R \ll a$) ряд в (3) быстро сходится, поэтому для дальнейшего анализа ограничимся первым его членом ($n=1$), что соответствует дипольному приближению в задаче

$$F_z = -\varepsilon_1 U^2 \left[1 - \sigma + 2\sigma'_s + \frac{(\varepsilon - \sigma)[2(\varepsilon + \sigma) + 1] + 2\sigma'_s(5\sigma - 6\sigma'_s)}{3 + 2\sigma - 6\sigma'_s} \right] \times \\ \times \frac{(R/a)^3 Q_1 Q_2}{2 + \sigma - 2\sigma'_s}. \quad (4)$$

Приравнявая электрическую силу (4) к силе тяжести $F_2 = (4/3)\pi R^3(\rho_1 - \rho_2)g$, получим оценку критического напряжения между электродами U_* , определяющего условие равновесия шара в центре отверстия,

$$U_*^2 = \frac{(4/3)\pi g a^3 (2 + \sigma - 2\sigma'_s) |\rho_1 - \rho_2|}{\varepsilon_1 \left[1 - \sigma + 2\sigma'_s + \frac{(\varepsilon - \sigma)[2(\varepsilon + \sigma) + 1] + 2\sigma'_s(5\sigma - 6\sigma'_s)}{3 + 2\sigma - 6\sigma'_s} \right] Q_1 Q_2}, \quad (5)$$

где ρ_1, ρ_2 — плотность жидкости и шара; g — ускорение силы тяжести.

При $R \gg \sigma_s/\sigma_1$ ($\sigma'_s \ll 1$) критическое напряжение не зависит от радиуса шара и имеет вид

$$U_0^2 = \frac{(4/3)\pi g a^3 (2 + \sigma) |\rho_1 - \rho_2|}{\varepsilon_1 \left[1 - \sigma + \frac{(\varepsilon - \sigma)[2(\varepsilon + \sigma) + 1]}{3 + 2\sigma} \right] Q_1 Q_2}. \quad (6)$$

Поделив соотношение (5) на (6), получим

$$(U_*/U_0)^2 = \frac{\left[1 - \sigma + \frac{(\varepsilon - \sigma)[2(\varepsilon + \sigma) + 1]}{3 + 2\sigma}\right] \frac{(2 + \sigma - 2\sigma'_s)}{2 + \sigma}}{1 - \sigma + 2\sigma'_s + \frac{(\varepsilon - \sigma)[2(\varepsilon + \sigma) + 1] + 2\sigma'_s(5\sigma - 6\sigma'_s)}{3 + 2\sigma - 6\sigma'_s}}. \quad (7)$$

Формула (7) не содержит коэффициентов $Q_1 Q_2$, поэтому ее несложно проверить экспериментально.

Экспериментальные результаты

В опытах исследовалось равновесие воздушных пузырей в касторовом масле в постоянном электрическом поле на установке, схема которой приведена на рис. 1. В стеклянную кювету помещались электроды 1, 2 — горизонтальные медные пластины толщиной 1 мм с расстоянием между ними 3.7 мм. В нижней пластине просверливалось отверстие диаметром 3.6 мм. На электроды подавалось постоянное напряжение U от высоковольтного стабилизированного источника ВС-23, которое измерялось киловольтметром С-96.

При некотором напряжении вдуваемый через стеклянную трубку β пузырек воздуха фиксировался электрической и гравитационной силами вблизи центра отверстия. В этом положении катетометром измерялся его диаметр. Затем постепенным уменьшением напряжения определялось минимальное U_* , при котором пузырек еще находится в равновесии.

На рис. 2 представлены результаты измерений (кружки и штриховая кривая). Сплошная линия проведена по формуле (7) при следующих значениях параметров: $\sigma = 0$ (воздух), $\varepsilon = 0.25$ (касторовое масло), $\sigma_s/\sigma_1 = 0.03$ мм, $U_0 = 3.6$ кВ. Как видно из графика, в пределах погрешности измерений радиуса пузырьков (± 0.01 мм) и напряжения (± 50 В) экспериментальная зависимость U_* от R качественно подтверждает вышеизложенный результат теории. Полученные данные могут использоваться как метод измерения поверхностной проводимости.

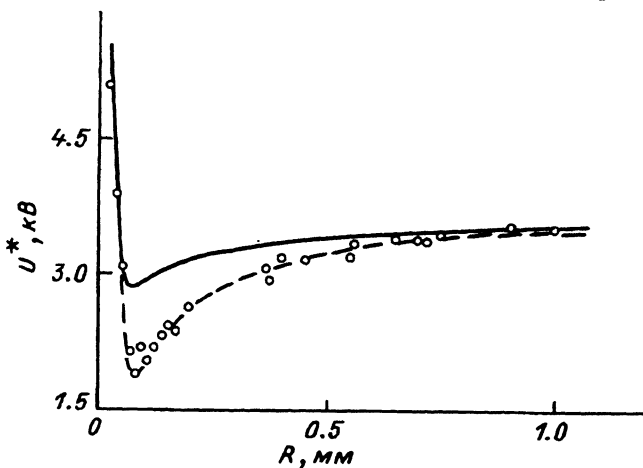


Рис. 2.

Авторы выражают благодарность Ю.К. Братухину за ряд полезных замечаний, а также критическое и доброжелательное отношение к работе.

Список литературы

- [1] Братухин Ю.К., Семенов В.А. // ЖЭТФ. 1982. Т. 83. С. 2170.
- [2] Семенов В.А. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 10. С. 2060–2064.
- [3] Семенов В.А. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 10. С. 2056–2058.
- [4] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 620 с.
- [5] Ван-Дайк М. Методы возмущений в механике жидкости. М.: Мир, 1967. 480 с.
- [6] Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Наука, 1959. 560 с.

02;10;11

Журнал технической физики, т. 65, в. 9, 1995

© 1995 г.

ИОННО-АССИСТИРУЕМОЕ ОСАЖДЕНИЕ СЛОЕВ НА МЕТАЛЛАХ

А.Ф. Комаров, А.А. Комаров, П.Тарковский

Белорусский государственный университет
Научно-исследовательский институт
прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко
220064, Минск, Беларусь
(Поступило в Редакцию 14 октября 1994 г.)

Введение

Полученные в ряде ведущих научно-исследовательских центров мира результаты по ионно-лучевому легированию металлов свидетельствуют о больших возможностях метода радиационной обработки для модификации механических, трибологических, коррозионных, каталитических и сверхпроводящих свойств материалов. Целенаправленно выбирая атомы легирующей примеси и режимы облучения с помощью метода ионной имплантации, можно обеспечить широкую гамму полезных свойств поверхностных слоев материалов. В частности, внедрением ионов азота в железо и различного сорта стали можно эффективно модифицировать полезные для практики свойства материалов, такие как прочность, износостойкость, коррозионная стойкость.

В последнее время одним из перспективных методов формирования износостойких тонкопленочных покрытий является метод ионно-плазменного осаждения с одновременной ионной имплантацией. Экспериментальные публикации последних лет свидетельствуют о том, что структура, трибологические и механические свойства пленок, создаваемых при ионном осаждении, в значительной степени зависят от характеристик сопровождающего ионного облучения (плотности тока, энергии, набранной дозы и т. д.). В частности, при увеличении плотности