

УДК 537

Д.С.Никандров (6 курс, каф. ФП), Л.Д.Цендин, д.ф.-м.н., проф.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТАУНСЕНДОВСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

Диэлектрический барьерный разряд (Dielectric-barrier discharge) - это разряд в газовой среде, заполняющей промежуток между электродами. Один или оба электрода покрыты диэлектриком (рис. 1). Впервые эти разряды были применены для производства озона [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Сейчас их широко используют при создании плазменных панелей [Ошибка! Источник ссылки не найден.], а также при производстве эксимерных ламп [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. При приложении к электродам переменного напряжения в газе возникает электрическое поле, определяемое приложенным к электродам напряжением, зарядами на поверхности диэлектрика и в газовом зазоре. В экспериментах и приложениях параметры разрядов менялись в широких пределах: давление составляло от единиц до сотен торр, частота приложенного напряжения - от единиц до сотен кГц [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Расстояние между электродами обычно порядка нескольких миллиметров.

Существуют три принципиально различных режима горения DBD разряда: Таунсендовский, однородный тлеющий и филаментированный. Наиболее прост Таунсендовский режим, так как при этом поля в разряде не искажаются объемным зарядом, и не образуется плазмы. Тлеющий режим горения, наблюдаемый, часто при высоких частотах внешнего напряжения, характеризуется сильным искажением поля из-за воздействия на него объемного заряда. Большую часть пространства разряда занимает плазма. Ток в филаментированном разряде протекает в тонких проводящих плазменных каналах – филаментах, хаотично прорастающих между электродами.

Несмотря на успехи в численном моделировании [Ошибка! Источник ссылки не найден.,5,6] существует необходимость в получении качественной аналитической картины таких разрядов.

В работе рассмотрен случай низкочастотного Таунсендовского барьерного разряда, когда частота много меньше обратного времени движения иона между электродами τ^{-1} . В низкочастотном разряде объемный заряд пренебрежимо мал. Поверхностные заряды на диэлектриках различаются только знаками. Как только поле в зазоре превышает E_{br} , оно вызывает сильно растущий ток. Ток, согласно принципу Ле-Шателье, будет удерживать поле на уровне, близком к E_{br} . Поэтому для построения первого приближения положим, что в Таунсендовском разряде электрическое поле не может быть больше пробойного: $|E(t)| \leq E_{br}$. Поэтому в течение фазы I, когда текут токи, меняющие поверхностный заряд, поле равно $E = E_{br}$ (рис. 2). Поверхностный заряд меняется также, как $U(t)$. В течение же фазы II, когда поле меньше E_{br} (рис. 2), ток не течет, и поверхностный заряд постоянен; поле в зазоре меняется аналогично приложенному напряжению.

В реальности на стадии II ток крайне мал. Он не может возрасти мгновенно до конечной величины, так что имеет место запаздывание тока относительно приложенного напряжения. В тот момент, когда поле достигает значения E_{br} , ток еще мал, и практически не меняет поверхностный заряд. Так что поле в зазоре продолжает возрастать, превышая

E_{br} . Этот процесс продолжается до тех пор, пока ток не возрастет настолько, что поверхностный заряд начнет существенно меняться, и напряженность поля станет убывать. При этом пока $E(t)$ остается больше E_{br} , ток будет продолжать возрастать. Уменьшаться ток начнет, как только поле станет меньше, чем E_{br} . Такая картина соответствует возникновению релаксационных колебаний.

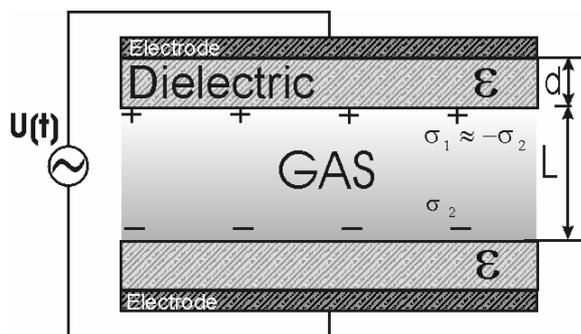


Рис. 1. Схема барьерного разряда

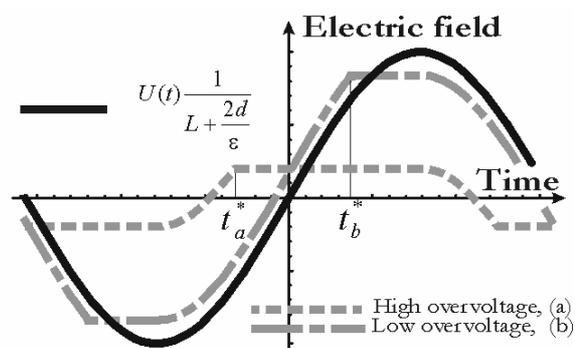


Рис. 2. Закон изменения поля в первом приближении.

Было получено и исследовано нелинейное дифференциальное уравнение, описывающее колебания поля в фазе I:

$$\frac{d^2 E}{d\theta^2} - \frac{d^2 \Phi}{d\theta^2} - \ln(M(E)) \left(\frac{dE}{d\theta} - \frac{d\Phi}{d\theta} \right) = -\iota \kappa$$

Здесь $\theta = \frac{t}{\tau}$, $E = \frac{E}{E_{br}}$, $\Phi = \frac{U}{1 + \frac{2d}{\epsilon L}} \frac{1}{E_{br} L}$, $\iota = \frac{j_{ext}}{j|_{t=0}}$, $\kappa = \frac{8\pi d}{(\epsilon L + 2d)} \frac{j|_{t=0}}{E_{br}} \tau$. При высокой частоте

колебаний полученное решение адиабатически отслеживает производную от внешнего напряжения по времени. Воздействие ионизатора приводит к затуханию колебаний, причем характерный декремент прямо пропорционален току внешнего ионизатора. Период колебаний малой амплитуды можно оценить как $\tau(1+X) \sqrt{\frac{8}{\Phi'_\theta X M'_E}}$, где $X = \ln\left(\frac{\Phi'_\theta}{\kappa}\right) - 1$.

Найденные оценки хорошо согласуются с результатами численных и натуральных экспериментов.

Определены зависимости поля и тока от времени в разных фазах DBD. Определены основные параметры, определяющие динамику параметров разряда, в том числе закон колебаний поля. Полученные выражения согласуются с экспериментами.

ЛИТЕРАТУРА:

1. G.M.Kogoma, *et al.* J.Phys.D: Appl.Phys. 24(1994) 1985-1987.
2. Th. Callegari, R. Ganter and J. Boeuf. J.Appl.Phys. 88(7), 2000.
3. A.Oda, Y.Sakai, H.Akashi and Sugawara J.Phys.D: Appl.Phys. 32(1999) 2726-2736.
4. Massines F., Rabehi A., Decomps Ph., Ben Gadri R., Segur P., Mayoux C. J. Appl. Phys. 83(1998) 2950-2957.

5. Yu.B.Golubovskii, V.A.Maiovov, J.Behnke and J.F.Behnke. J.Phys.D: Appl. Phys. 36 (2003) 975-981.
6. Yu.B.Golubovskii, V.A.Maiovov, J.Behnke and J.F.Behnke. J.Phys.D: Appl. Phys. 35 (2002) 1-11.