



**“Fizika-2005”**  
**Beynəlxalq Konfrans**  
**International Conference**  
**Международная Конференция**



7 - 9 **İyun** **June** **2005** №118 **səhifə** **page** **450-452**  
**Июнь** **стр.**

**Bakı, Azərbaycan**

**Baku, Azerbaijan**

**Баку, Азербайджан**

**ИМПУЛЬСНЫЕ РАЗРЯДЫ НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ТВЕРДЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ**

**ГАШИМОВ А.М., МЕХТИЗАДЕ Р.Н, ГУРБАНОВ Е.Д, БОНДЯКОВ А.С.**

*Институт Физики НАН Азербайджана*  
*Az-1143, Баку, пр.Джавида,33*  
*Тел.(994 12)439-44-02 E-mail: arif@physics.ab.az*

Настоящая статья посвящена аналитическому обзору серии работ российской школы электрофизиков (Екатеринбург, Новосибирск, Москва, Томск, Арзамас) по исследованиям воздействия наносекундных импульсных разрядов на газы и твердые диэлектрики. Рассматривается развитие наносекундных импульсов в плотных газах, нелокальный критерий убегания электронов в разрядных промежутках, сравнимых с обратным коэффициентом Таунсенда. Показано влияние сильных электрических полей на свойства твердых диэлектриков. Представлена количественная связь между электрическими параметрами процесса, свойствами диэлектрика, пространственно-временными характеристиками импульсного разряда.

The present article is dedicated to analytical review of the Russian electrophysics school works (Ekaterinburg, Novosibirsk Moscow, Tomsk, Arzamas) on researches of nanosecond impulse discharges influence on different gases and solid dielectrics. Is considered the nanosecond impulse development in solid gases, non-local criterion of electrons run off in discharge gap, compared with inverse coefficient of Townsend. Is shown the strong electrical fields influence on the properties of solid dielectrics. Is presented to quantitative connection between the process electrical parameters, the dielectrics properties and the space-time characteristics of the impulse discharge.

В последние десятилетия уделяется огромное внимание развитию высоковольтной импульсной техники для реализации различных целей, как исследовательского характера, так и прикладного. Во многих отраслях промышленности и техники наблюдается переход от микросекундных импульсов высокого напряжения к импульсам наносекундного диапазона [1]. Особый интерес представляет как изучение самого наносекундного импульса высокого напряжения при воздействии на разрядный промежуток, так и его влияние на комплекс электрофизических свойств твердых диэлектриков и выявление новых явлений, ранее не учитываемых в них при воздействии сильных полей.

Во многих работах [2] показано, что Таунсендовский механизм ионизации справедлив даже для очень сильных полей, когда расстояние до катода велико и напряженность поля превышает критическое значение, при котором можно пренебречь ионизационным трением электронов о газ. В этом случае для определения средней энергии  $E^*$ , надо учитывать изменение числа электронов при  $E > E_{кр}$ , как показано в приведенной ниже формуле:

$$\frac{d(N_e E^*)}{dx} = eEN_e - F(E^*)N_e \quad (1)$$

$$\frac{dN_e}{dx} = \alpha_i \cdot N_e \quad (2)$$

$$\frac{dE^*}{dx} = eE - F(E^*) - \alpha_i E^* \quad (3)$$

где  $\alpha_i$  - коэффициент ударной ионизации,  $E^*$  - средняя энергия электронов.

Из формулы видно, что даже при полном пренебрежении торможением электронов о газ  $F(E^*) = 0$ , средняя энергия электронов ограничена

$$E^* < E_{max}^* = \frac{eE}{\alpha} \quad (4)$$

и при очень больших межэлектродных промежутках имеет место Таунсендовский механизм ионизации, а убегающие электроны отсутствуют и долетающие до анода электроны имеют малые энергии  $E^* \ll eU$ .

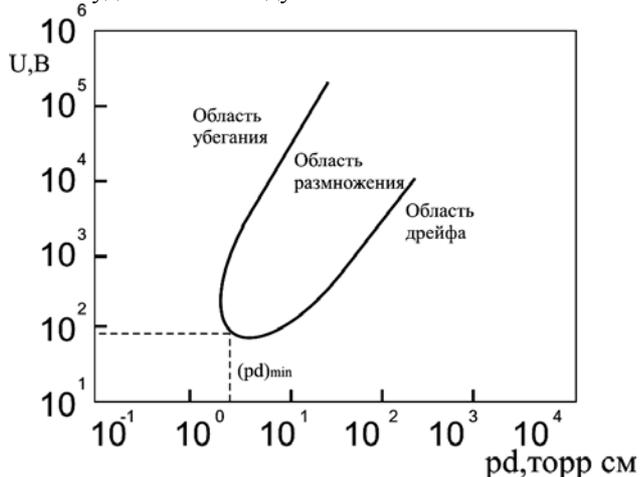
При малых межэлектродных расстояниях, когда  $d < \frac{1}{\alpha_i}$ , картина размножения электронов

радикально отличается от Таунсендовской и в спектре электронов преобладают убегающие электроны с максимальной энергией  $eU = eEd$ , и нижняя точка на кривой Пашена  $(pd)_{\min}$  соответствует  $\max \alpha_i$ .

Саму кривую Пашена при этом можно разделить на три зоны: верхняя левая ветвь кривой соответствует области убегания электронов, область между левой и правой ветвями – области размножения электронов, а зона ниже правой ветви – области дрейфа электронов, не успевших размножиться, как показано на рис. 1

Были проведены эксперименты [3] в однородном и неоднородном электрических полях при повышенных давлениях в различных газах (азот, воздух, гелий, неон, аргон, криптон) без источника предионизации.

В неоднородном поле при атмосферных условиях в воздухе и наносекундных длительностях импульсов получены высокие удельные энерговклады – до  $1 \text{ Дж/см}^3$  и электронный пучок с рекордной амплитудой тока в воздухе  $\sim 70 \text{ А}$  и в гелии  $\sim 200 \text{ А}$ .



В этом случае сильноточный пучок при высоком давлении образовывается за счет убегающих электронов. В однородном поле на фронте импульса напряжения наблюдается объемный заряд в виде струй с плазменными сгустками на катоде. При уменьшении межэлектродного расстояния диффузный разряд переходит в контрагированный искровой разряд. Величина и длительность разрядного тока при объемном разряде зависят от параметров генератора, межэлектродного расстояния, давления и сорта газа. При длительности объемного разряда в 3 нс, плотность тока у анода достигает  $3 \text{ кА/см}^2$ , удельный энерговклад  $\sim 1 \text{ Дж/см}^3$ , а удельная мощность энерговода  $\sim 400 \text{ МВт/см}^3$ . При этом напряжение на промежутке максимально в квазистационарной стадии разряда, т.е. на фронте импульса, когда количество быстрых электронов велико, а скорость распространения лавин, порождаемых этими электронами составляет

$v_e \approx 10^8 \text{ см/с}$  за счет предионизации промежутка и которые формируют объемный разряд.

Эффект убегания электронов в механизме пробоя и всей динамике импульсного разряда в плотных газах играет фундаментальную роль при больших перенапряжениях, когда  $\Delta \gg 1$  [4]. Участие убегающих электронов в пробое плотных газов обнаруживается в смещении минимума кривой Пашена  $U(pd)$  с ростом  $\Delta$ , т.е. сокращением фронта импульса напряжения  $\tau_f$  в область больших  $pd$ . При этом появляется еще одна фундаментальная зависимость

$$U_{\min} = f((pd)_{\min}) \approx \left(\frac{E}{p}\right)_{кр} \cdot (pd)_{\min},$$

которой для разных газов представляют огромный интерес. Также для физики и техники высоковольтных импульсов высокого давления представляют интерес исследования ускорительных процессов при давлениях выше атмосферного, которые эффективны в системах иницирования и накачки газовых лазеров высокого давления.

При воздействии наносекундных импульсов высокого напряжения на твердые диэлектрики, также необходимо учитывать скорость распространения разряда, параметры состояния плазмы в канале разряда, его геометрические размеры и т.д. Уже недостаточно знать только параметры, разрядного промежутка и импульса высокого напряжения. При прямом измерении скорости распространения каналов разряда методом электронно-оптической хронографии было установлено, что скорость звука является пределом для скоростей распространения канала разряда с катода и анода, т.е.  $v_k < c_0 < v_a$  где  $v_k$  – скорость разряда с катода,  $v_a$  – скорость распространения разряда с анода,  $c_0$  – скорость звука. Изменение этой границы «сверху» и «снизу» за счет изменения параметров импульса ( $U, dU/dt$ ) были безуспешными. Механизм перехода от дозвукового первичного канала к сверхзвуковому анодному требует специального изучения. Скорость  $v_a$  определяется преимущественно напряжением  $U_0$  и соответствующим ему мгновенным значением  $dU/dt$ , а скорость  $v_k$  зависит исключительно от величины  $U_0$ . Влияние  $d$  и  $dU/dt$  отсутствует [5]. Это может быть связано с неустойчивостью фазовой границы твердого диэлектрика со своим расплавом. Сверхзвуковая скорость изменения кривизны границы при воздействии сверхсильных полей приводит к возникновению ударной волны, которая является следствием бурного энерговыделения за счет инжекции электронов из валентной зоны в зону проводимости и образования комплекса «ударная волна + зона энерговыделения», получившего название электронной детонации. В результате этого возникает плотная неидеальная плазма высокого давления, при саморазрушении которой выделяется энергия, запасенная в ионной подсистеме. Степень ионизации инжектированных электронов будет определяться [6], как

$$\chi_e = \omega \frac{\Delta}{v_a} \quad (5)$$

где  $\omega = \frac{n}{N}$  - вероятность ионизации,  $c^{-1}$ ,  $n$  - число электронно-дырочных пар, образующихся в ед. времени в ед. объема,  $N$  - число валентных электронов. В свою очередь  $\omega$  зависит от ширины запрещенной зоны и определяется, как

$$\omega = \frac{n}{N} = \frac{(eEd^*)^2}{2\pi\hbar E_D^*} \exp\left(\frac{Ed^*}{eEd^*} \ln \frac{1}{\alpha}\right) \quad (6)$$

где  $\alpha$  - отношение ширины валентной зоны к ширине зоны проводимости,  $E_D^*$  и  $d^*$  - соответственно эффективное значение ширины запрещенной зоны и постоянной решетки при ударном сжатии.

При сжатии твердых тел зависимость толщины запрещенной зоны от давления соответственно представляется следующей формулой

$$E_D^* = E_{D_0} - a_p \cdot p \quad (7)$$

где  $a_p = \gamma \cdot \kappa$  - барический коэффициент, Дж Па<sup>-1</sup>,  $\kappa$  - коэффициент сжимаемости,  $\gamma$  - коэффициент пропорциональности.

Эти выражения позволяют количественно оценить в диэлектриках зависимость давления  $P$ , вероятности ионизации  $\omega$ , и значения  $E_D^*$  от скорости электронно-детонационной волны. Выявленные закономерности позволяют использовать представления и методы физики высоких плотностей энергии для описания динамики и параметров состояния вещества в канале разряда на фронте перехода при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях его распространения [7]. Очевидно, что скорость этого процесса в различных диэлектрических средах и его «стартовые» параметры ( $U_0$ ,  $dU/dt$ ) представляют особый интерес.

Для корректного количественного учета влияния сжимаемости на процесс инжекции электронов в твердых диэлектриках необходимо проведение ряда экспериментов и теоретических исследований. Прежде всего, это относится к изучению влияния давления на электронную структуру широкозонных диэлектриков. Это позволит более строго определить значения барических коэффициентов  $a_p$ . Можно сказать, что в этом случае зависимость эта будет нелинейной в широком интервале давлений. Таким образом, при воздействии наносекундных импульсов высокого напряжения на твердые диэлектрики была установлена количественная связь между электрическими параметрами процесса, физическими свойствами диэлектрика, параметрами вещества за фронтом фазового перехода и пространственно-временными характеристиками импульсного разряда.

В настоящем обзоре подведены итоги недавних исследований физики импульсных разрядов в газах и их воздействия на твердые диэлектрики. Рассмотрен нелокальный критерий убегания электронов в плотных газах, когда расстояние между электродами становится сравнимым с обратным коэффициентом Таунсенда. Рассмотрен объемный разряд, который формируется благодаря предбионизации быстрыми киловольтными электронами, возникающими на плазменных катодных сгустках. Рассмотрен механизм пробоя твердых диэлектриков при воздействии наносекундных импульсов, установлена количественная связь между электрическими параметрами процесса и физическими свойствами диэлектрика и их взаимное влияние друг на друга.

Результаты анализа показали, что учет этого влияния может привести к коррекции существующих и выявлению новых, ранее не учитываемых явлений, происходящих в твердых диэлектриках.

- 
- [1]. Вершинин Ю.Н. Механизм электронного пробоя твердых диэлектриков, Изв.РАН, энергетика, 2, 2003, с.152-157
- [2]. Ткачев А.М., Яковленко С.И. Коэффициент Таунсенда и характеристики убегания электронов в азоте. Письма в ЖТФ, 30 (7) 14 (2004)
- [3]. Костыря И.Д., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.М., Яковленко С.И. Роль быстрых электронов в формировании объемного импульсного разряда при повышенных давлениях. Письма в ЖТФ, 30(10) 31 (2004)
- [4]. Бабич Л.П., Лойко Т.В., Цукерман В.А. Высоковольтный наносекундный разряд в плотных газах при больших перенапряжениях, развивающийся в режиме убегания электронов. УФН, 160 (7)49 (1990)
- [5]. Вершинин Ю.Н. Соотношение скоростей электрического разряда и звуков в твердом диэлектрике. ЖТФ, том 59, вып.2, 1989, с.158-160
- [6]. Вершинин Ю.Н., Ильичев Д.С. Электронная детонация в твердых диэлектриках. ДАН, том 365, №5, 1999, с.617-620
- [7]. Вершинин Ю.Н., Ильичев Д.С., Морозов П.А. Влияние ударного сжатия твердых диэлектриков на процесс инжекции валентных электронов в сильных электрических полях. ЖТФ, том 70, вып.1, 2000