

цированного заряда и распадаются, выбрасывая около двухсот дочерних сильно заряженных капелек, линейные размеры которых на два порядка меньше размеров распадающейся капли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев А.И. Неустойчивости заряженных капель в электрических полях (обзор) // Электронная обработка материалов. 1990. № 6. С. 23–32.
2. Григорьев А.И., Ширяева С.О. Капиллярные неустойчивости заряженной поверхности капель и электродиспергирование жидкостей (обзор) // Изв. РАН. МЖГ. 1994. № 3. С. 3–22.
3. Белоножко Д. Ф., Григорьев А.И. Деление заряженных капель во внешнем электрическом поле на части сравнимых размеров (обзор) // Электронная обработка материалов. 2000. № 4. С. 17–28.
4. Григорьев А.И. Электродиспергирование жидкости при реализации колебательной неустойчивости ее свободной поверхности (обзор) // ЖТФ. 2000. Т. 70. № 5. С. 22–27.
5. Grigor'ev A.I., Shiryayeva S.O. Mechanism of elektrostatik poiydispersion of liquid // J. Phys. D: Appl. Phys. 1990. V. 23. № 11. P. 1361–1370.
6. Григорьев А.И., Ширяева С.О. Закономерности рэлеевского распада заряженной капли // ЖТФ. 1991. Т.61. № 3. С. 19–27.
7. Жаров А.Н., Ширяева С.О., Григорьев А.И. Диспергирование заряженной капли в электростатическом поле // ЖТФ. 1999. Т.69. №12. С. 26–30.
8. Ширяева С.О. О некоторых закономерностях поляризации и диспергирования капли в электростатическом поле // ЖТФ. 2000. Т.70. № 6. С. 20–26.
9. Григорьев А.И., Ширяева С.О., Белавина Е.И. Равновесная форма заряженной капли в электрическом и гравитационном полях // ЖТФ. 1989. Т. 59. № 6. С. 27–34.

Поступила 28.12.01

Summary

The sizes and charges of a droplets emitting on nonlinear stage of realization of Tonks – Frenkel instability are calculated. It is shown that emitting droplets are unstable up to the surface charge.

Л.З. Богуславский, Н.И. Кускова, В.Н. Петриченко, С.А. Хайнацкий

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД В ГРАФИТЕ И ЕГО ОСОБЕННОСТИ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский 43 А, г. Николаев, 54018, Украина*

Введение

В связи с открытием сфероидальных кластеров углерода – фуллеренов [1] и не утратившим актуальность поиском современных технологий получения алмазов [2] особое внимание привлекает характер протекания электрического разряда в такой форме углерода, как графит. Графит обладает высокой электропроводностью, сравнимой с металлической, и имеет характерные отличия, обусловленные его структурой. В то же время есть достаточно много видов графитовых материалов, обладающих низкими значениями электропроводностей.

Известно, что под воздействием сильного электрического поля в веществе может формироваться разряд, реализующийся в виде электрического пробоя (ЭП) или электрического взрыва (ЭВ) в зависимости от того, является данное вещество диэлектриком или проводником. Однако веществ,

© Богуславский Л.З., Кускова Н.И., Петриченко В.Н., Хайнацкий С.А., Электронная обработка материалов, 2002, № 3, С. 32–38.

обладающих идеальной проводимостью, или являющихся идеальными диэлектриками, в природе не существует, поэтому реальные вещества, содержащие различные примеси, могут занимать промежуточное положение и проявлять те или иные свойства. Кроме разделения электрического разряда на две категории (ЭВ и ЭП), каждая из них, в свою очередь, может иметь несколько видов, определяемых типом вещества и параметрами электрической цепи. Поэтому целью настоящей работы является исследование зависимости характера протекания возможных видов высоковольтного электрического разряда в веществе от его параметров на примере графита.

Экспериментальные результаты

Нами была проведена серия экспериментальных исследований электрического разряда в цилиндрических графитовых проводниках, погруженных в жидкий диэлектрик и имеющих длину $l = 0,04$ м и разные диаметры ($3 \cdot 10^{-4}$, $5 \cdot 10^{-4}$ и $7 \cdot 10^{-4}$ м), при различных режимах (начальные напряжения изменяли от $9,8 \cdot 10^3$ до $4 \cdot 10^4$ В, емкости конденсаторов: $C_1 = 6 \cdot 10^{-6}$ Ф и $C_2 = 10^{-6}$ Ф, индуктивность $L = 3 \cdot 10^{-6}$ Гн). Исследуемые образцы обладали различными электропроводностями – от $2 \cdot 10^3$ до $7 \cdot 10^5$ См/м и плотностями – от $1,4 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^3$ кг/м³.

Осциллографирование токов и напряжений для различных графитовых проводников и параметров цепи показало, что формирование и развитие в них электрического разряда происходит по-разному. На рис. 1 приведены характерные для разных видов разряда осциллограммы токов и напряжений. Как следует из приведенных осциллограмм, все режимы можно разделить на две основные категории:

- режимы, при которых реализуется взрыв проводника – рис. 1,а – з;
- режимы, подобные пробоям – рис. 1,д.

Было исследовано более тридцати различных режимов разряда. Для сравнительного анализа характера разных видов и режимов был использован метод, основанный на критериях подобия, полученных для ЭВ металлических проводников [3]. Критерии подобия $P_1 - P_3$ применяют для приближенного описания всех стадий электрического взрыва проводников:

- P_1 – стадии нарастания тока,
- P_2 – фазы взрыва (резкого спада тока),
- P_3 – разряда через продукты взрыва проводника.

Используемая для расчета P_3 искровая постоянная $A = 10^4$ (В²·с)/м², согласно [3], не зависит от материала проводника. Необходимые для анализа данные (начальные диаметры d и электропроводности σ проводников, запасенные энергии W_0 и энергии, необходимые для сублимации всего проводника W_s , особенности разряда и набор критериев подобия $P_1 - P_3$) для некоторых характерных режимов рассчитаны и приведены в таблице.

Осциллограммы, характерные для ЭВ, в свою очередь можно разделить по режимам на несколько видов:

- режимы с паузой тока (1, 5, 8) – рис. 1,а;
- без пробоя по продуктам взрыва (режим 4) – рис. 1,б;
- без паузы тока (режим 9) – рис. 1,в;
- согласованные режимы (7, 10) – рис. 1,г.

Из таблицы видно, что для указанных режимов характер протекания ЭВ определяется соотношением между W_0 и W_s . Так, для всех режимов с паузой тока $W_0 < W_s$, при отсутствии вторичного пробоя $W_0 \ll W_s$. Для согласованного режима $W_0 \sim W_s$, а в беспauseных режимах $W_0 > W_s$.

Рассмотренные режимы разрядов в терминах безразмерных критериев подобия характеризуются областью, ограниченной кривой зависимости предельных значений P_3 , как функции P_2 [3]. Так, все режимы с паузой тока для графитовых проводников не попадают в область существования беспauseных разрядов, полученную для металлических проводников, и, наоборот, беспauseные режимы строго ложатся в эту область. Это говорит об универсальности критериев подобия $P_1 - P_3$, полученных для металлических проводников [3], то есть применимости их к неметаллическим взрывающимся проводникам.

Была проведена также скоростная фоторегистрация (СФР) электроразрядных процессов для разных режимов, позволившая зафиксировать особенности развития каждой из указанных категорий разряда. Полученные СФР-граммы представлены на рис. 2.

СФР-грамма пробойного режима приведена на рис. 2,а. Из СФР-граммы видно, что на начальной стадии проводник взрывается неоднородно по длине, а плазменная область начинает светиться около положительного электрода и со временем распространяется на всю длину. Такой вид подобен распространению плазменного лидера при разряде в воде [3].

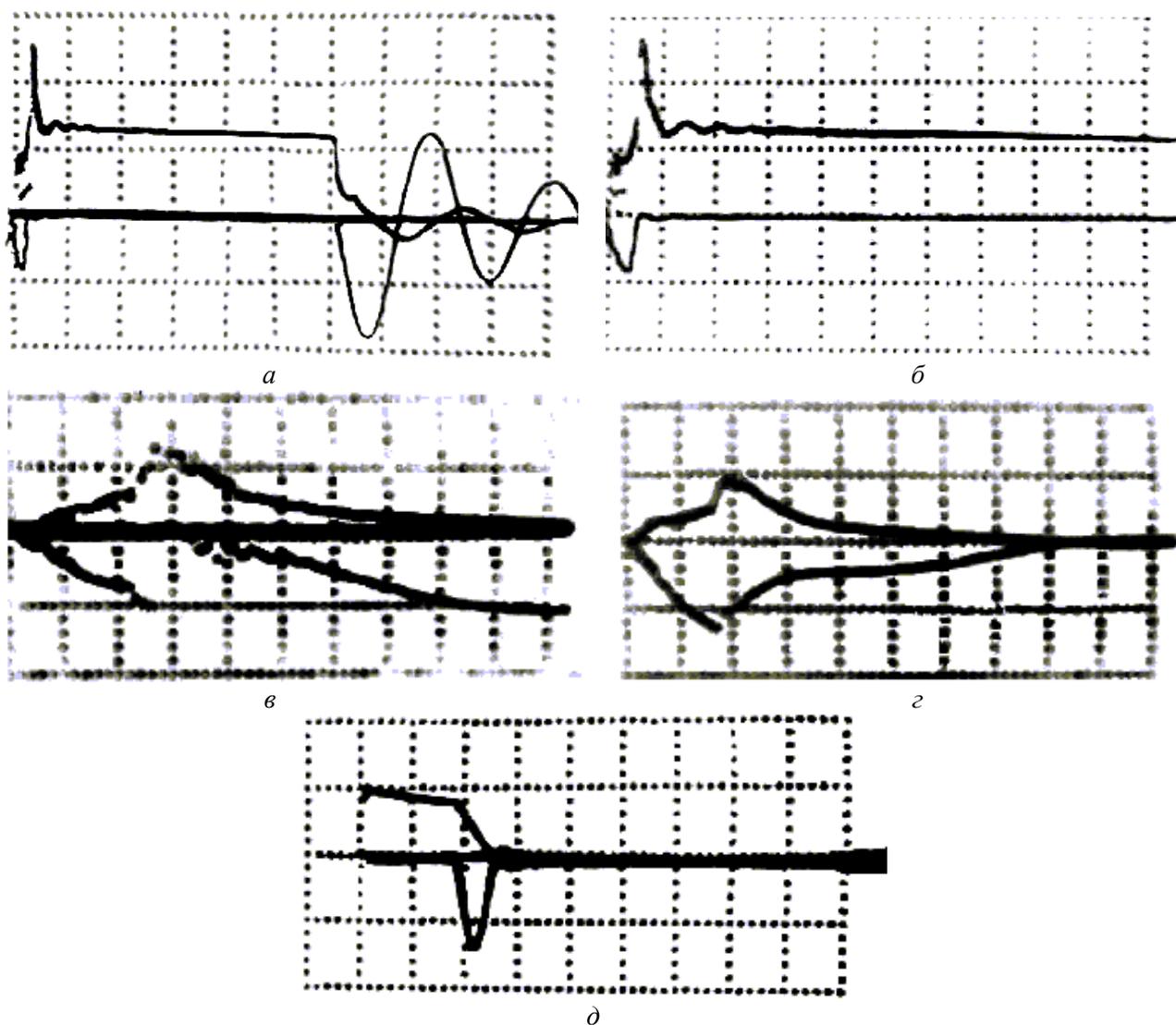


Рис. 1. Характерные осциллограммы тока и напряжения для различных режимов разряда. Верхняя кривая – напряжение, нижняя – ток.

а – ЭВ с паузой тока, развертка $\tau = 20$ мкс/дел; б – ЭВ, $\tau = 20$ мкс/дел; в – ЭВ без паузы тока, $\tau = 0,5$ мкс/дел; г – согласованный режим ЭВ, $\tau = 1$ мкс/дел ; д – ЭП, $\tau = 20$ мкс/дел.

Характеристики разряда

№ режима	W_0 , 10^2 Дж	d , 10^{-4} м	σ , 10^4 См/м	Вид разряда	W_s , 10^2 Дж	P_1	P_2	P_3 , 10^{-2}
1	2,00	3	12,5	ЭВ с паузой тока	3,12	3,19	3,35	2,31
2	2,00	5	0,8	ЭП	8,67	12,30	5,43	2,31
3	2,00	7	0,6	ЭП	17,00	10,60	2,35	2,31
4	2,00	5	12,5	ЭВ, нет пробоя	8,67	1,52	0,43	2,31
5	3,00	5	12,5	ЭВ с паузой тока	8,67	3,72	1,60	3,77
6	3,00	7	0,2	ЭП	17,00	10,10	3,05	3,77
7	3,00	3	12,5	ЭВ согласованный	3,12	7,82	12,3	3,77
8	5,75	5	12,5	ЭВ с паузой тока	8,67	3,72	3,59	1,68
9	6,62	3	12,5	ЭВ без паузы тока	3,12	3,19	11,1	0,70
10	8,60	5	12,5	ЭВ согласованный	8,67	1,52	1,44	0,70

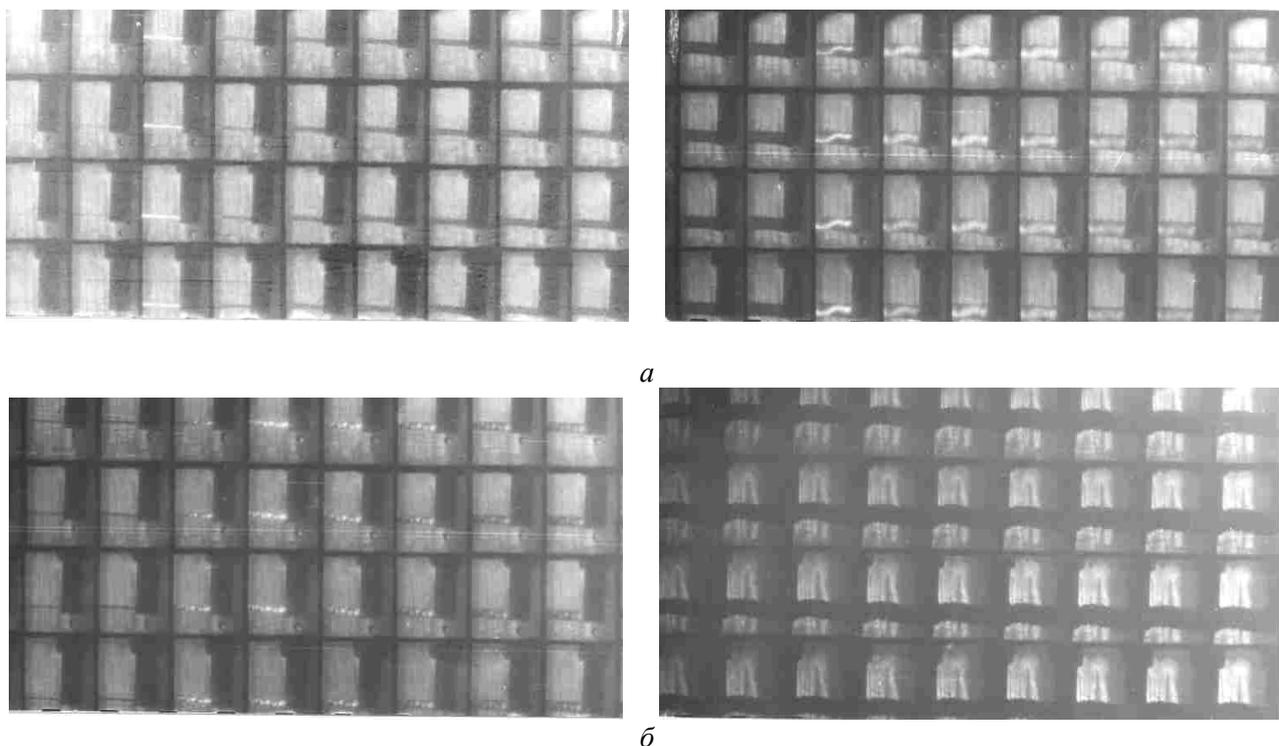


Рис. 2. Характерные СФР-граммы развития разряда в графитовых проводниках разной проводимости (начальная и конечная стадии). Время между кадрами 1 мкс: а – ЭВ; б – ЭП.

СФР-грамма взрывного режима графитового проводника с паузой тока приведена на рис. 2,б. Ее вид показывает, что проводник взрывается однородно (свечение однородное по всей длине). На стадии паузы тока расширение продуктов взрыва происходит линейно по времени. Пробой продуктов взрыва реализуется через промежутки времени длительностью от 40 до 80 мкс. При этом плазменный канал светится не по всему объему продуктов первичного взрыва, что говорит о возможной реализации либо поверхностного пробоя, либо пробоя слоя газовой фазы.

Анализ данных таблицы показывает, что появление пробойных режимов (2, 3, 6) характеризуется большим начальным сопротивлением образцов (электропроводность $\sigma < 10^4$ См/м). Это подтверждает и величина критерия подобия – $P_1 > 10$. По СФР-грамме можно определить, что электрический разряд распространяется к противоэлектроду со скоростью $u \sim 10^4$ м/с.

Как следует из проведенных нами теоретических и экспериментальных исследований электрического разряда в слабопроводящих конденсированных средах [4–6], механизм формирования электрического разряда в данном случае представляет собой нагрев, испарение и переход в плазменное состояние углерода в локальной приэлектродной области. Распространение разряда связано с диффузией поля в соседние слои, то есть ничем не отличается от неоднородного (скинового) ЭВ, при котором фазовые переходы происходят локально, начиная с поверхностного слоя, а распространяются не по направлению поля, а от поверхности к оси проводника. После замыкания плазменной областью межэлектродного промежутка по образуемому каналу проходит мощный импульс тока, нагревающий вещество до температур $T \sim 10^4$ К.

Обсуждение результатов

1. Начальная стадия разряда

Как видно из приведенных осциллограмм тока, в графитовых стержнях, обладающих достаточно высокой проводимостью, приложение электрического поля вызывает резкий рост тока. При низкой электропроводности ток продолжительное время практически равен нулю, а напряжение возрастает до заданной величины за время порядка 1 мкс.

Можно найти величину электропроводности, разделяющую вещества на два вида, соответствующие двум возможным формированиям в них высоковольтного электрического разряда: в виде ЭП или ЭВ.

Так как вещество реагирует на появление электрического поля практически мгновенно, то необходимо наблюдать за происходящими в нем изменениями с момента времени $t = 0$. Распреде-

ление поля в пространстве определяется формой и размерами проводника, а во времени – параметрами электрической цепи. Рассмотрим случай, когда подаваемое на электроды напряжение возрастает экспоненциально $U = e^{\beta t}$ (β – коэффициент нарастания напряжения), проводник имеет форму – цилиндра, радиус которого a , длина – l .

Процесс диффузии продольного электрического поля в проводник, замыкающий электроды и обладающий электропроводностью σ , может быть описан уравнением диффузии

$$\Delta E = \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t}, \quad (1)$$

где E – z -компонента напряженности электрического поля, μ – магнитная проницаемость, σ – электропроводность.

Двумерное уравнение диффузии поля в цилиндрических координатах имеет вид

$$\frac{\partial^2 E}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E}{\partial r} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t}. \quad (2)$$

Запишем решение уравнения (2), полученное методом разделения переменных,

$$E(r, z, t) = \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\pm 1)^n}{2^{2n} (n!)^2} \left(\frac{r}{\delta} \right)^{2n} \right) \exp\left(\beta t - \frac{z}{d}\right), \quad (3)$$

где $\frac{1}{\delta^2} \equiv \left| \frac{1}{d^2} - \mu\sigma\beta \right|$, δ – толщина скин-слоя, которую определяют из граничных условий, d – глубина проникновения поля (по оси z).

Выражение (3) представляет собой две разные функциональные зависимости, соответствующие разным условиям: при возрастании поля и $\mu\sigma\beta > d^{-2}$

$$E(r, z, t) = \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^{2n} (n!)^2} \left(\frac{r}{\delta} \right)^{2n} \right) \exp\left(\beta t - \frac{z}{d}\right). \quad (4)$$

При условии $\mu\sigma\beta < d^{-2}$

$$E(r, z, t) = J_0\left(\frac{r}{\delta}\right) \exp\left(\beta t - \frac{z}{d}\right), \quad (5)$$

где $J_0\left(\frac{r}{\delta}\right)$ – функция Бесселя первого рода.

Если образец проявляет свойства диэлектрика, то поле проникает во весь объем, занимаемый веществом. Тогда должно выполняться $d > l$, $\delta > a$.

При $d \ll l$, $\delta \ll a$ образец при включении поля ведет себя как проводник. В тонких проводниках может выполняться $d \ll l$, $\delta > a$. Если электроды прижаты к поверхностям проводника $z = 0$ и $z = l$, то $\delta = \infty$, $\delta^{-1} = 0$. Тогда

$$d = \frac{1}{\sqrt{\mu\sigma\beta}}, \quad (6)$$

а решение однородно по радиусу

$$E(z, t) = E_0 \exp\left(\beta t - \frac{z}{d}\right). \quad (7)$$

Для выполнения неравенства $d \ll l$ достаточно выполнения условия $d < 0,01l$, подставляя в которое (6), получим выражение для оценки электропроводностей, при которых возможен ЭВ цилиндрического проводника

$$\sigma > \frac{10^2}{\mu\beta l^2}. \quad (8)$$

Найдем из выражения (8) величины электропроводностей, при которых электрический разряд будет развиваться в виде ЭВ, и сравним их с экспериментальными данными (см. таблицу 1). При указанных параметрах проводника и цепи $\beta \sim (4-6) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$, тогда $\sigma > 10^4 \text{ См/м}$, что совпадает с полученными нами экспериментальными результатами для всех электровзрывных режимов 1, 4, 5, 7–10.

Таким образом, условие (8) позволяет определить минимальную величину электропроводности, при которой в веществе при высокой плотности энергии формируется ЭВ. При заданной величине электропроводности в слабопроводящем веществе ЭВ может быть реализован при значениях коэффициента нарастания поля, определяемых из того же выражения (8).

2. Особенности ЭВ графитовых проводников

Магнитное давление распределено по радиусу проводника неоднородно [3]

$$P(r) = \frac{\mu I^2}{(2\pi a)^2} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right), \quad (9)$$

где I – ток, r – расстояние от оси проводника.

Подставляя максимальные амплитуды токов при ЭВ, вычислим магнитные давления на оси проводника $P(0)$. Для токов $I < 2,5 \cdot 10^7 \text{ А}$ получаем давления $P(0) < 2 \cdot 10^7 \text{ Па}$. Так как в центре проводника давления максимальны, то и во всем проводнике $P < 2 \cdot 10^7 \text{ Па}$. При таких давлениях, как следует из фазовой диаграммы, графит не переходит в жидкое состояние, а при нагреве до температуры $T_f = 4200 \text{ К}$ происходит испарение твердого графита [7, 8].

Существование режимов, при которых не осуществляется плавление проводника, является особенностью ЭВ графитовых проводников. Отсутствие жидкой фазы графита приводит к видоизменению осциллограмм тока и напряжения (рис. 1,а,б), на которых нет реперных точек, соответствующих моменту плавления проводника, и участков с медленно меняющимися током и напряжением, характерных для жидкой фазы.

Так как давление распределено по радиусу проводника неоднородно, а температура испарения зависит от давления, то в зависимости от степени неоднородности испарение может быть объемным или распространяться в виде волны. Характерный размер δ_p неоднородности, связанной с неоднородностью давления, находим из выражения [9]

$$\delta_p \cong \frac{\lambda^*}{cP(0)} \cdot \frac{dP}{dT_f} \frac{a^2}{2r}, \quad (10)$$

где λ^* – теплота испарения; c – теплоемкость графита; dP/dT_f – производная вдоль кривой фазового равновесия твердое тело–газ.

При $a = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$; $P(0) \approx 1,6 \cdot 10^7 \text{ Па}$; $r = 0,5a$; $\lambda^* = 2 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$; $dP/dT_f \approx 10^4 \text{ Па/К}$ получим $\delta_p \approx 10^{-3} \text{ м}$. Так как характерный размер неоднородности на порядок превышает радиус проводника, то можно сделать вывод о реализации при выбранных режимах ЭВ объемного (однородного) испарения графитового стержня, возможность которого связана в данном случае со слабой зависимостью температуры испарения от давления.

Заключение

Найдены характерные величины электропроводности или коэффициента нарастания напряжения, определяющего параметры цепи, при которых электрический разряд в твердом веществе может формироваться в виде ЭВ. Если напряжение растет до значений $U \sim 10^4 \text{ В}$ за время порядка 1 мкс, то граничная величина электропроводности $\sigma \sim 10^4 \text{ См/м}$.

Режимы ЭВ без последующего пробоя (рис. 1,б) представляют собой нагрев и испарение графита в виде частичек углерода.

При режимах ЭВ, в которых пробой происходит без паузы тока (рис. 1,в) расчетное магнитное давление во внутренних слоях превышает величину $2 \cdot 10^7 \text{ Па}$. В этом случае внешние слои графита

при нагреве до температуры сублимации испаряются, а внутренние плавятся. Такое явление невозможно в металлических проводниках при давлениях выше нормального.

Согласованный режим ЭВ (рис. 1,з) представляет собой нагрев проводника, приводящий к плавлению, реализации жидкой фазы графита и ее кипению, при этом режиме запасенная энергия равна энергии сублимации.

Показано, что характерной особенностью ЭВ графитовых проводников микросекундной длительности является существование режимов с однородным испарением (рис. 1,а,б), в отличие от ЭВ металлических проводников, при котором однородными являются плавление и жидкая фаза металла [9].

При указанных режимах на испарение стержня расходуется только часть запасенной энергии, а сама запасенная энергия в 1,5–2 раза меньше энергии сублимации всего графитового проводника. Такое соотношение между запасенной энергией и энергией сублимации обеспечивает умеренный режим испарения, при котором углерод не разлагается на отдельные атомы, а испаряется в виде легких кластеров углерода, которые могут содержать от двух до десяти атомов.

Пары графита не проводят ток, поэтому при испарении ток уменьшается. Продукты испарения образуют парогазовую полость, окруженную жидкостью. По мере расширения парогазовой полости давление и плотность паров в ней уменьшаются, что создает условия для ионизации паров электрическим полем, то есть электрического пробоя.

Как следует из анализа работ, посвященных исследованию синтеза фуллеренов электродуговым способом [1], режим нагрева и испарения графита должен быть умеренным. Генерация низкотемпературной углеродной плазмы и ее разлет реализуются как при электродуговом способе, так и при ЭВ графитовых проводников с паузой тока. Таким образом, ЭВ графитовых проводников может быть использован для получения фуллеренов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. Фуллерены // Успехи физических наук. 1993. Т.163. № 2. С. 33–60.
2. Savvatimski A.I., Fortov V.E. Thermophysical Properties of Liquid Metals and Graphite, and Diamond Production Under Fast Heating // High Temperatures High Pressures. 1998. Vol. 30. P. 1–18.
3. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. Киев, 1986.
4. Кускова Н.И. Волны фазовых превращений в сильных электрических полях // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. Вып. 14. С. 41–44.
5. Кускова Н.И. Искровые разряды в конденсированных средах // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 2. С. 120–124.
6. Boguslavskii L.Z., Khaynatsky S.A., Shcherbak A.N. Optical Studies of the Plasma–Liquid Transition Layer in Pulsed Corona Discharges in Strong Water Electrolytes // Technical Physics. 2001. Vol. 46. No. 2. P. 174–178.
7. Bundy F.P., Basset W.A., Weathers M.S. The Pressure–Temperature Phase and Transformation Diagram for Carbon // Carbon. 1996. Vol. 34. № 2. P. 141–153.
8. Мармер Э.Н. Углеродные материалы. М., Металлургия. 1973.
9. Tkachenko S.I., Kuskova N.I. Dynamics of Phase-transitions at Electrical Explosion of Wire // Journ. Phys.: Condens. Matter. 1999. Vol. 9. P. 6175–6184.

Поступила 18.12.01

Summary

Experimental investigations on electrical discharges in graphite materials of different values of electric conductivity have been conducted for microsecond expositions. A condition has been obtained for which high-voltage discharge in non-metallic conductors is formed as electrical explosion. Various kinds of electrical discharge in graphite and their features are described.