


## Анализ и математическая интерпретация физических процессов при факельном разряде

Д.Н. Новомейский, М.Н. Пиганов 

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
443086, Россия, г. Самара,  
Московское шоссе, 34

*Аннотация* – Рассмотрено уравнение теплового баланса факельного разряда. Приведены основные теплофизические характеристики. Описано взаимодействие разряда с пленочным элементом. Система кратер – нагретая зона пленки представлена в виде системы «нагретое тело цилиндрической формы – полуограниченный массив». Приведена математическая модель взаимодействия. Была использована цилиндрическая система координат. При этом принята экспоненциальная зависимость электропроводности от температуры.

*Ключевые слова* – факельный разряд, анализ, физические процессы, математическая модель, тепловой баланс, пленочный элемент.

### Введение

Для обработки пленочных структур изделий электронной техники (ИЭТ) широко используется высокочастотный факельный разряд (ВЧФР) [1; 2]. Это связано с его высокой технологичностью [3]. Физика свободного ВЧФР хорошо изучена и описана во многих источниках [4–10]. Однако недостаточно полно изучены процессы его взаимодействия с обрабатываемыми элементами. В работах [11; 12] предложены математические модели взаимодействия ВЧФР с пленочными структурами. Однако в ряде случаев, например при изготовлении прецизионных тонкопленочных резисторов, требуется более высокая точность математических моделей. В связи с этим в данной работе поставлена задача дальнейшего изучения процесса взаимодействия ВЧФР с пленочными структурами ИЭТ с целью построения более точных моделей.

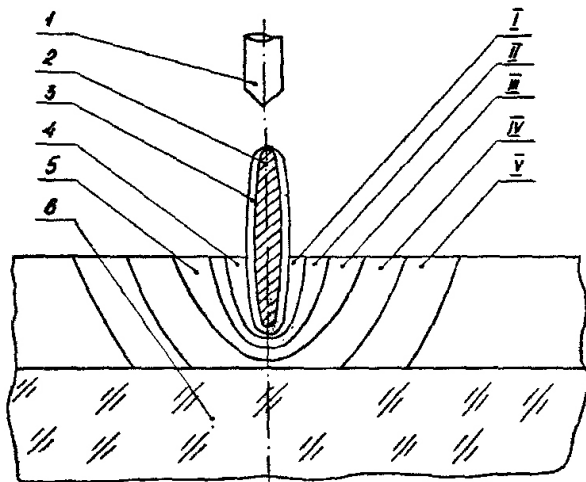
### 1. Описание процессов взаимодействия факельного разряда с пленочным элементом

Как известно, факельный разряд имеет вид тонкого яркого шнура, окруженного менее яркой оболочкой. При взаимодействии ВЧФР с резистивной пленкой локальный участок последней в месте их взаимодействия будет представлять собой совокупность зон с различными фазовыми и переходными состояниями вещества резистивной пленки. Схематическое изображение этих зон приведено на рисунке [12], где показано взаимодействие фа-

кела и пленки в определенный момент времени. Зона I представляет собой зону испаренного вещества резистивной пленки, а зона II – область интенсивного испарения. Следует отметить, что эти участки различаются лишь концентрацией частиц испаряемого вещества. В зоне IV происходит плавление материала пленки, а область III представляет собой переходную зону от жидкой до газообразной фаз резистивного вещества, где происходит его дальнейшее нагревание. Отметим также, что тепло, ушедшее в стенки, не только расходуется на плавление, но и отводится теплопроводностью вглубь материала пленки, поэтому для увеличения достоверности результатов учтем влияние теплопроводности металлической пленки в виде наличия зоны V, в которой происходит спад температуры от точки плавления до температуры окружающей среды в сторону периферийных участков пленки. Необходимо отметить, что границы зон показаны условно, характер их изменения с течением времени на рисунке также не отражен.

При составлении математической модели необходимо учесть свободную конвекцию вдоль оси разряда и излучение оболочки факела в окружающее пространство [11].

Отметим, что в начале воздействия ВЧФР на резистивную пленку он взаимодействует с плоской поверхностью и продукты разрушения распределяются по полусфере. В связи с этим в процессе формирования кратера происходит уменьшение угла распределения удаленного за пределы локальной области резистивного вещества. Форма и



**Рис.** Схема взаимодействия факельного разряда с толстой резистивной пленкой: 1 – электрод; 2 – канал факела; 3 – оболочка факела; 4 – кратер; 5 – пленка; 6 – подложка; I–V – участки резистивной пленки в зоне взаимодействия [12]

**Fig.** Scheme of interaction of a torch discharge with a thick resistive film: 1 – electrode; 2 – torch channel; 3 – torch shell; 4 – crater; 5 – film; 6 – substrate; I–V – sections of the resistive film in the interaction zone [12]

размеры кратера зависят от теплофизических характеристик материала.

Исходя из вышеописанного, отметим, что при составлении математического уравнения энергобаланса следует учитывать механические и химические взаимодействия частиц на молекулярном уровне в области кратера и в некоторой зоне над ним.

Математическая интерпретация теплового баланса должна учитывать тот факт, что часть энергии передается от ВЧФР через резистивную пленку подложке.

Наряду с этим отметим, что в дальнейшем не будет учитываться уровень интегрального излучения, как и зависимость некоторых физико-химических процессов от давления. Пинч-эффектом (эффектом самостоятельного разряда) также можно пренебречь как несущественным при составлении данной математической модели.

## 2. Математическая интерпретация физических процессов

Вначале отметим, что для данной модели удобно применить цилиндрическую систему координат с началом в точке пересечения оси факела с внешней плоской границей пленки. Ось  $Z$  совместим с осью ВЧФР, при этом за положительное направление оси выберем направление распространения разряда. Эта система координат удобна тем, что ни одна из физических характеристик в этом случае не зависит от угла  $\Theta$  [11].

В общем случае уравнение теплового баланса (для ВЧФР с учетом вышеуказанной системы координат в свободном пространстве) имеет вид

$$\operatorname{div}(\lambda_{\phi} \operatorname{grad} T_Z) = \sigma E^2 - C_{\text{в}} \rho_{\text{в}} \left( V_Z \frac{\partial T_Z}{\partial Z} + V_r \frac{\partial T_Z}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где член  $C_{\text{в}} \rho_{\text{в}} \tau \left( V_Z \frac{\partial T_Z}{\partial Z} + V_r \frac{\partial T_Z}{\partial r} \right)$  учитывает свободную конвекцию вдоль оси разряда и ее радиальную составляющую.

Для случая взаимодействия ВЧФР с резистивной пленкой уравнение баланса запишем как:

$$\operatorname{div}(\lambda_{\phi} \operatorname{grad} T_Z) = \sigma E^2 - C_{\text{в}} \rho_{\text{в}} \left( V_Z \frac{\partial T_Z}{\partial Z} + V_r \frac{\partial T_Z}{\partial r} \right) - \sum_{i=1}^6 P_i. \quad (2)$$

Здесь  $P_1$  – мощность излучения оболочки факела в окружающую среду;  $P_2$  – мощность, расходуемая на испарение вещества пленки;  $P_3$  – мощность, расходуемая на нагрев в зонах I, II (рисунок) от  $T_n$  до  $T_u$ ;  $P_4$  – мощность, идущая на плавление материала резистивной пленки в зонах I–IV;  $P_5$  – мощность, идущая на нагрев в зонах I–IV от  $T_i$  до  $T_n$ ;  $P_6$  – мощность, расходуемая на нагрев резистивной пленки в зоне V.

Рассмотрим действие высокочастотного факельного разряда (ВЧФР) на резистивную пленку в течение времени  $\tau < \tau_0$ , где  $\tau_0$  – полное время взаимодействия, причем при этом значении  $\tau \neq 0$  существуют все пять зон. Отметим, что последнее условие тождественно условию образования зоны I, наличие которой уже говорит о существовании остальных.

С учетом  $\tau$  уравнение (2) примет вид

$$\operatorname{div}(\lambda_{\phi} \operatorname{grad} T_Z) \tau = \sigma \tau E^2 - C_{\text{в}} \rho_{\text{в}} \tau \left( V_Z \frac{\partial T_Z}{\partial Z} + V_r \frac{\partial T_Z}{\partial r} \right) - \sum_{i=1}^6 Q_i, \quad (3)$$

где  $Q_i = P_i \tau$ , что соответствует [11].

Отметим, что  $S_u$  и, следовательно,  $m_u$  за  $\tau_0$  считаются заданными. Тогда

$$Q_2(\tau_0) = L_u m_u. \quad (4)$$

К моменту  $\tau$  испарилась лишь часть пленки с массой  $m_u$ . Примем

$$m_u(\tau) = m_u \frac{\tau}{\tau_0}, \quad (5)$$

и тогда

$$Q_2(\tau) = L_u m_u \frac{\tau}{\tau_0}. \quad (6)$$

За время  $\tau_0$  будем иметь  $Q_3 = Q'_3 + Q''_3$ , где  $Q''_3$  – теплота, ушедшая на нагрев  $m_u$  от температуры  $T_n$

до температуры  $T_u$ ;  $Q_3''$  – теплота, идущая на нагрев расплава  $m_n$  от  $T_n$  до  $T_u$ . Найдем значения теплоты  $Q_3'$  и  $Q_3''$ :

$$Q_3' = C_{nR} m_u (T_u - T_n), \quad (7)$$

$$Q_3'' = C_{nR} k_{1nn} m_{nn} (T_u - T_n), \quad (8)$$

где коэффициент  $k_{1nn}$  учитывает неравномерность нагрева участка с  $m_{nn}$  от зоны  $R_{nn}$  с температурой  $T_u$  до зоны  $R_n$  с температурой  $T_n$ .

Аналогично для  $Q_4$  и  $Q_5$  имеем:

$$Q_4 = L_n [(m_u + k_{1nn} m_{nn}) + k_{1n} m_n], \quad (9)$$

$$Q_5 = C_R (T_n - T_0) [m_u + k_{1nn} + k_{1n} m_n]. \quad (10)$$

Выражение для  $P_1$  принимает вид:

$$P_1 = \varepsilon C_0 S_{0\phi} \phi [(0,01T_\phi)^4 - (0,01T_c)^4]. \quad (11)$$

Найдем мощность  $P_6$ :

$$P_6 = C_R \rho_R \int_V (T_i - T_0) dV, \quad (12)$$

где  $dV = d\theta dr dz$ .

После преобразования получим

$$P_6 = C_R \rho_R \int_V T_i dV + C_R \rho_R \int_V (-T_0) dV = P_6' + P_6''. \quad (13)$$

что аналогично [12].

Мощность  $P_6''$  представим следующим образом:

$$P_6'' = C_R \rho_R \int_0^{2\pi} \int_0^{R_i} \int_0^{R_n} (-T_c) dr dz d\theta, \quad (14)$$

и, проинтегрировав три раза по всем координатам, получим

$$P_6'' = -2\pi h C_R \rho_R T_c (R_H - R_n). \quad (15)$$

Рассмотрим систему кратер (локальная область взаимодействия ВЧФР с резистивной пленкой) – нагретая зона пленки как систему нагретое тело цилиндрической формы – полуограниченный массив. Тогда в соответствии с (13) имеем:

$$\begin{cases} P_{KR} = \frac{1}{2\pi h \lambda_R} \ln \frac{2h}{a}, \\ R_{KR} = \frac{T_i - T_0}{P_6'}, \end{cases} \quad (16)$$

где  $a = \frac{R_u + R_n}{2}$  – приведенный радиус цилиндрического кратера. Из системы (16) следует:

$$T_i - T_0 = P_6' \frac{1}{2\pi h \lambda_R} \ln \frac{2h}{a}. \quad (17)$$

Выражение (17) вместе с (13) образует систему

$$\begin{cases} T_i = T_0 + P_6' \frac{\ln \frac{4h}{R_u + R_n}}{2\pi h \lambda_R}, \\ P_6' = C_R \rho_R \int_V T_i dV. \end{cases} \quad (18)$$

Решив ее относительно  $P_6'$ , получим:

$$P_6' = C_R \rho_R \int_0^{2\pi} \int_0^{R_i} \int_0^{R_n} \left( T_c + P_6' \frac{\ln \frac{4h}{R_u + R_n}}{2\pi h \lambda_R} \right) d\theta dr dz,$$

или

$$P_6' = 2\pi h C_R \rho_R T_0 (R_H - R_n) +$$

$$\frac{\ln \frac{4h}{R_u + R_n}}{2\pi h \lambda_R} C_R \rho_R P_6' 2\pi h (R_H - R_n),$$

или

$$P_6' = \frac{2\pi h C_R \rho_R T_0 (R_H - R_n)}{1 - \frac{C_R \rho_R (R_H - R_n)}{\lambda_R} \ln \frac{4h}{R_u + R_n}}. \quad (19)$$

В данной математической модели зависимостью некоторых величин от давления мы пренебрегаем. Будем также считать, что радиус канала факела намного меньше длины.

Примем коэффициенты теплопроводности постоянными и равными некоторым средним значениям  $\bar{\lambda}$ .

Все удельные теплоемкости будем считать также постоянными.

Особо следует отметить, что учет подложки сильно усложняет математическое исследование температурного поля, и получение аналитического решения становится весьма проблематичным. Поэтому этим влияние подложки в математической модели отражено не будет.

В связи с громоздкостью выражений, учитывающих химические и механические взаимодействия частиц на молекулярном уровне, опустим их с учетом того, что их удельный вес по сравнению с другими членами модели очень мал.

### 3. Построение математической модели

Левую часть уравнения (1) представим для нашего случая в виде

$$\operatorname{div}(\lambda_\phi \operatorname{grad} T_Z) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \lambda_\phi \frac{\partial T_Z}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_\phi \frac{\partial T_Z}{\partial z} \right), \quad (20)$$

или

$$\begin{aligned} \operatorname{div}\left(\lambda_{\phi} \operatorname{grad} T_Z\right) = \\ = \rho_B C_B V_Z \frac{\partial T_Z}{\partial Z} + \rho_B C_B V_Z \frac{\partial V_Z}{\partial Z} \left( \lambda_{\phi} \frac{\partial T_Z}{\partial Z} \right). \end{aligned} \quad (21)$$

Правую часть уравнения (3) с учетом выражений из п. 2 запишем в виде

$$\begin{aligned} \sigma \tau E^2 - C_B \rho_B \tau \left( V_Z \frac{\partial T_Z}{\partial Z} + V_r \frac{\partial T_Z}{\partial r} \right) - \\ - \varepsilon C_0 \varphi S_0 \phi 10^{-8} \left( T_{\phi}^4 - T_0^4 \right) \tau - L_u m_u \frac{\tau}{\tau_0} - \\ - C_{nR} m_u \frac{\tau}{\tau_0} (T_u - T_n) - C_{nR} k_{1Hn} m_{Hn} (T_u - T_n) - \\ - L_u (m_u + k_{1Hn} m_{Hn} + k_{1H} m_n) - \\ - C_R (T_n - T_0) (m_u + R_{1Hn} m_{Hn} + k_{1H} m_n) + \\ + 2\pi h C_R \rho_R T_0 (R_n - R_n) \tau - \\ - \frac{2\pi h C_R \rho_R T_0 (R_H - R_n) \tau}{1 - \frac{C_R \rho_R (R_H - R_n)}{\lambda_R}} \ln \frac{4h}{R_u + R_n}. \end{aligned} \quad (22)$$

Рассмотрим случай, когда  $V_Z = \text{const}$ , т. е.  $\frac{\partial V_Z}{\partial Z} = 0$ , тогда левая часть уравнения (3) с учетом (21) примет вид

$$\operatorname{div}\left(\lambda_{\phi} \operatorname{grad} T_Z\right) \tau = \rho_B C_B V_Z \tau \frac{\partial T_Z}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial Z} \left( \lambda_{\phi} \frac{\partial T_Z}{\partial Z} \right). \quad (23)$$

Нашей задачей является нахождение зависимости  $T_Z$  от  $Z$  вдоль оси канала, т. е. вдоль оси  $Z$  без учета радиального распределения.

Учтем, что в выражении (22) можно пренебречь радиальной конвекционной составляющей.

Приравняв правые части выражений (22) и (23) и сделав ряд эквивалентных преобразований, получим:

$$\begin{aligned} \rho_B C_B V_Z \tau \frac{\partial T_Z}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial Z} \left( \lambda_{\phi} \frac{\partial T_Z}{\partial Z} \right) = \\ = \sigma E^2 - C_B \rho_B V_Z \frac{\partial T_Z}{\partial Z} - \varepsilon C_0 \varphi S_0 \phi 10^{-8} \left( T_{\phi}^4 - T_0^4 \right) - \\ - \frac{L_u m_u}{\tau_0} - C_{nR} m_u \frac{(T_u - T_n)}{\tau_0} - \\ - \frac{C_{nR} k_{1Hn} m_{Hn} (T_u - T_n)}{\tau} - L_u - \\ - \frac{L_n + C_R (T_n - T_0)}{\tau} (m_u + k_{1Hn} m_{Hn} + k_{1H} m_n) + \\ + \frac{2\pi h C_R^2 \rho_R^2 T_0 (R_H - R_n)^2 \ln \frac{4h}{R_u + R_n}}{1 - \frac{C_R \rho_R (R_H - R_n)}{\lambda_R}} \ln \frac{4h}{R_u + R_n}. \end{aligned} \quad (24)$$

Выразим все массы через  $m_u$  и приведем подобные члены:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial Z} \left( \lambda_{\phi} \frac{\partial T_Z}{\partial Z} \right) = \sigma E^2 - 2C_B \rho_B V_Z \frac{\partial T_Z}{\partial Z} - \\ - \varepsilon C_0 \varphi S_0 \phi 10^{-8} \left( T_{\phi}^4 - T_0^4 \right) - \frac{L_u m_u}{\tau_0} - \\ - C_{nR} m_u \frac{(T_u - T_n)}{\tau_0} - \frac{C_{nR} k_{1Hn} k_{2Hn} m_u (T_u - T_n)}{\tau} - \\ - \left[ L_n + C_R (T_n - T_0) \right] \times \\ \times \left( m_u + k_{1Hn} k_{2Hn} m_u + k_{1H} k_{2H} m_u \right) \frac{1}{\tau} + \\ + 2\pi h C_R^2 \rho_R^2 T_0 (R_H - R_n)^2 \ln \frac{4h}{R_u + R_n} \times \\ \times \left[ 1 - \frac{1}{\lambda_R} C_R \rho_R (R_H - R_n) \ln \frac{4h}{R_u + R_n} \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (25)$$

Далее с учетом выражения (5) имеем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial Z} \left( \lambda_{\phi} \frac{\partial T_Z}{\partial Z} \right) = \sigma E^2 - 2C_B \rho_B V_Z \frac{\partial T_Z}{\partial Z} - \\ - \varepsilon C_0 \varphi S_0 \phi 10^{-8} \left( T_{\phi}^4 - T_0^4 \right) - \frac{L_u m_u}{\tau_0} - \\ - C_{nR} m_u \frac{(T_u - T_n)}{\tau_0} - \frac{C_{nR} k_{Hn} m_u (T_u - T_n)}{\tau_0} - \\ - \left[ L_n + C_R (T_n - T_0) \right] \times \\ \times \left( m_u \frac{\tau}{\tau_0} + k_{Hn} m_u \frac{\tau}{\tau_0} + k_{Hn} m_u \frac{\tau}{\tau_0} \right) \frac{1}{\tau_0} + \\ + 2\pi h C_R^2 \rho_R^2 T_0 (R_H - R_n)^2 \ln \frac{4h}{R_u + R_n} \times \\ \times \left[ 1 - \frac{1}{\lambda_R} C_R \rho_R (R_H - R_n) \ln \frac{4h}{R_u + R_n} \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (26)$$

Примем для электропроводности экспоненциальную зависимость от температуры:

$$\sigma = a e^{bT_Z}, \quad (27)$$

тогда итоговое выражение математической модели будет иметь вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial Z} \left( \lambda_{\phi} \frac{\partial T_Z}{\partial Z} \right) = a E^2 e^{bT_Z} - 2\rho_B C_B V_Z \frac{\partial T_Z}{\partial Z} - \\ - \varepsilon C_0 \varphi S_0 \phi 10^{-8} \left( T_{\phi}^4 - T_0^4 \right) - \\ - \frac{\rho_R h S_u}{\tau_0} \left[ L_u + C_{nR} (T_u - T_n) (1 + k_{Hn}) \right] - \\ - \left[ L_n + C_R (T_n - T_0) \right] \frac{\rho_R h S_u}{\tau_0} (1 + k_{Hn} + k_n) + \end{aligned} \quad (28)$$

$$+ 2\pi h T_0 \ln \frac{4h}{R_u + R_n} [C_{RP} (R_H - R_n)]^2 \times \\ \times \left[ 1 - C_{RP} \frac{1}{\lambda_R} (R_H - R_n) \ln \frac{4h}{R_u + R_n} \right]^{-1}.$$

### Заключение

Проведенный анализ и математическая интерпретация физических процессов при факельном разряде дали возможность уточнить уравнение те-

плового баланса. Это позволило построить новый вариант математической модели взаимодействия факельного разряда с пленочным элементом.

Полученное дифференциальное уравнение может быть решено путем замены выражения  $\alpha E^2 e^{bT_z}$  бесконечным рядом. Кроме того, появляется возможность разработки моделей более высокой точности. Для этого необходимо учесть зависимость ряда теплофизических характеристик от  $T_z$  и  $z$ .

### Список литературы

1. Чернобровкин Д.И., Мишанин Н.Д., Пиганов М.Н. Прибор для подгонки тонкопленочных элементов микросхем // Приборы и системы управления. 1978. № 6. С. 45–46.
2. Пиганов М.Н., Шопин Г.П., Столбиков А.В. Устройство для подгонки толстопленочных резисторов. Пат. 2371797. Российская Федерация МПК Н01С 17/22.; заявитель и патентообладатель: СГАУ. № 2008127155/09; заявл. 03.07.2008, опублик. 27.10.2009. Бюл. № 30. 9 с.
3. Пиганов М.Н., Волков А.В. Подгонка сопротивления толстопленочных резисторов методом факельного разряда // Техника средств связи. Сер.: Технология производства и оборудование. 1985. № 2. С. 29–35.
4. Трехов Е.С., Фоменко А.Ф. Влияние параметров безэлектродного плазмотрона на режим работы высокочастотного генератора // Физика газоразрядной плазмы. 1968. Вып. 1. С. 18–22.
5. Качанов А.В., Трехов Е.С., Фетисов Е.П. Электродинамическое описание высокочастотного факельного разряда // Физика газоразрядной плазмы. 1968. Вып. 1. С. 39–47.
6. Трехов Е.С., Тюрин Е.Л., Фетисов Е.П. К теории высокочастотного факельного разряда в воздухе // Физика газоразрядной плазмы. 1969. Вып. 2. С. 148–155.
7. Электродинамика высокочастотного факельного разряда / И.А. Тихомиров [и др.] // Известия Томского политехнического университета. 2003. Т. 306. № 1. С. 21–29.
8. Луценко Ю.Ю., Власов В.А., Зеленецкая Е.П. Влияние осевой неоднородности плазмы высокочастотного факельного разряда на его электродинамические характеристики // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20. № 1. С. 117–122.
9. Тихомиров И.А., Тихомиров В.В., Федянин В.Я. Определение некоторых параметров высокочастотного факельного разряда // Известия Томского политехнического университета. 1972. Т. 225. С. 186–188.
10. Халдеев В.Н., Макаров М.Н. К вопросу о факельном компоненте энергии электрического разряда // Электрофизические и электрохимические методы обработки. 2014. № 4 (82). С. 13–22.
11. Столбиков А.В., Пиганов М.Н., Костин А.В. Построение математической модели распределения температуры газа вдоль оси канала факельного разряда при взаимодействии с толстопленочными элементами микросборок // Вестник СГАУ. 2011. № 7. С. 113–116.
12. Костин А.В., Пиганов М.Н., Столбиков А.В. Математическое моделирование взаимодействия высокочастотного факельного разряда с элементами конструкции радиоаппаратуры // Вестник СГАУ. 2011. № 7. С. 117–121.

### References

1. Chernobrovkin D.I., Mishanin N.D., Piganov M.N. The device for adjusting the thin-film element ICs. *Pribory i sistemy upravlenija*, 1978, no. 6, pp. 45–46. (In Russ.)
2. Piganov M.N., Shopin G.P., Stolbikov A.V. *The device for adjusting the thick-film resistors*. Pat. 2371797. The Russian Federation MPK N01S 17/22.; the applicant and the patentee: State Aerospace University. № 2008127155/09; appl. 03.07.2008, published 27.10.2009. Bull. № 30. 9 p.
3. Piganov M.N., Volkov A.V. She trimming resistance thick film resistors by jet discharge. *Tehnika sredstv svyazi. Ser. Tehnologija proizvodstva i oborudovanie*, 1985, no. 2, pp. 29–35. (In Russ.)
4. Trehov E.S., Fomenko A.F. Effect parameters electrodeless plasma torch for the high-frequency generator operating mode. *Fizika gazorazrjadnoj plazmy*, 1968, no. 1, pp. 18–22. (In Russ.)
5. Kachanov A.V., Trehov E.S., Fetisov E.P. Electrodynamical description high jet discharge. *Fizika gazorazrjadnoj plazmy*, 1968, no. 1, pp. 39–47. (In Russ.)
6. Trehov E.S., Tjurin E.L., Fetisov E.P. Theory vysokochastonogo air jet discharge. *Fizika gazorazrjadnoj plazmy*, 1969, no. 2, pp. 148–155. (In Russ.)
7. Tihomirov I.A. et al. Electrodynamics high frequency jet discharge. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta*, 2003, vol. 306, no. 1, pp. 21–29. (In Russ.)
8. Lutsenko Ju.Ju., Vlasov V.A., Zelenetskaja E.P. Influence of the inhomogeneity axial high frequency plasma jet discharge characteristics at its electrodynamic. *Teplofizika i aeromehanika*, 2013, vol. 20, no. 1, pp. 117–122. (In Russ.)
9. Tihomirov I.A., Tihomirov V.V., Fedjanin V.Ja. Determination of some parameters of the high frequency jet discharge. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta*, 1972, vol. 225, pp. 186–188. (In Russ.)
10. Haldeev V.N., Makarov M.N. Concerning the flare component electric discharge energy. *Elektrofizicheskie i elektrohimicheskie metody obrabotki*, 2014, no. 4 (82), pp. 13–22. (In Russ.)

11. Stolbikov A.V., Piganov M.N., Kostin A.V. Construct a mathematical model of the gas temperature distribution along the axis of the jet discharge channel interaction with thick-film elements microassemblages. *Vestnik SGAU*, 2011, no. 7, pp. 113–116. (In Russ.)
12. Kostin A.V., Piganov M.N., Stolbikov A.V. Computer simulation of high-frequency jet discharge with radio design elements. *Vestnik SGAU*, 2011, no. 7, pp. 117–121. (In Russ.)

## Physics of Wave Processes and Radio Systems

2020, vol. 23, no. 1, pp. 67–72

DOI 10.18469/1810-3189.2020.23.1.67-72

Received 2 March 2020

Accepted 20 March 2020

### Analysis and mathematical interpretation of flare discharge physical processes

D.N. Novomeysky, M.N. Piganov 

Samara National Research University  
34, Moskovskoye shosse  
Samara, 443086, Russia

*Abstract* – Flare discharge heat balance equation is considered. The main thermophysical characteristics are given. The interaction between flare discharge and film structure is described. System «heated cylinder – semi-limited array» is used. A mathematical model of interaction is given. Cylindrical coordinates system is used. Temperature dependence of conductivity is exponential.

*Keywords* – flare discharge, analysis, physical processes, mathematical model, heat balance, film component.

#### Информация об авторах

**Новомейский Дмитрий Николаевич**, аспирант кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, инженер-конструктор второй категории АО «НИИ «Экран». Окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева по специальности «Проектирование и технология радиоэлектронных средств».

*Область научных интересов:* проектирование и разработка устройств факельной подгонки пленочных резисторов.

*E-mail:* dmitr.novomeysky@yandex.ru

**Пиганов Михаил Николаевич**, 1951 г. р., доктор технических наук, профессор кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева. Окончил радиотехнический факультет Куйбышевского авиационного института имени С.П. Королева по специальности «Конструирование и производство радиоаппаратуры». Кандидат технических наук с 1981 г. Диссертацию защитил в специализированном совете Московского авиационного института имени Серго Орджоникидзе по специальности 05.12.18 – Твердотельная электроника и интегральная схемотехника, включая материалы, технологию и оборудование. Докторскую диссертацию защитил в Таганрогском радиотехническом институте по специальности «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoelectronика, приборы на квантовых эффектах». С 1986 по 2002 г. – заведующий кафедрой микроэлектроники и технологии радиоэлектронной аппаратуры Самарского государственного аэрокосмического университета (Куйбышевского авиационного института). С 2004 по 2013 г. – заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств Самарского государственного аэрокосмического университета. Член Федерального УМО по направлению «Электроника, радиотехника и системы связи». Член редколлегии журнала «Надежность и качество сложных систем».

*Область научных интересов:* надежность и качество бортовых радиоэлектронных средств.

*E-mail:* piganov@ssau.ru

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-1830-4507>

#### Information about the Authors

**Dmitry N. Novomeysky**, postgraduate student of the Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, Samara National Research University, Samara, Russia; engineer of the second category with JSC SRI «Ekran». He graduated from the Samara State Aerospace University as a specialist «Design and technology of electronic means».

*Scientific interests:* design and development of devices for flare fitting of film resistors.

*E-mail:* kipres@ssau.ru

**Mikhail N. Piganov** was born in 1951, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, Samara National Research University, Samara, Russia. He graduated from the Radio Engineering Faculty of the Kuibyshev Aviation Institute with a Design and Production Technology of Radioelectronic Equipment degree. He got a Ph.D. degree in engineering in 1981. He defended his dissertation at the Moscow Aviation Institute named after Sergo Ordzhonikidze on «Solid-State Electronics Including Materials, Technology and Equipment». He defended his doctoral dissertation at the Southern Federal University on «Solid-State Electronics Electronic Components, Micro and Nano Electronics, Quantum Effect Equipment». He headed the Department of Microelectronics and Design of Radioelectronic Equipment of the Kuibyshev Aviation Institute from 1986 to 2002. He headed the Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices of Samara State Aerospace University from 2004 to 2013. Member of the Federal UMO in the field of «Electronics, Radio Engineering and Communication Systems». Member of the Editorial Board of the journal «Reliability and Quality of Complex Systems».

*Scientific interests:* reliability and quality of board electrical equipment.

*E-mail:* piganov@ssau.ru

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-1830-4507>