

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ФАКЕЛЬНОГО РАЗРЯДА С ЭЛЕМЕНТАМИ КОНСТРУКЦИИ РАДИОАППАРАТУРЫ

© 2011 А. В. Костин, М. Н. Пиганов, А. В. Столбиков

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Проведено математическое моделирование взаимодействия высокочастотного факельного разряда с элементами конструкции радиоаппаратуры типа «толстая резистивная пленка». Исследовано взаимодействие факельного разряда с пленочными структурами. Получено математическое выражение, которое связывает все физические и геометрические параметры системы «разряд-пленка-подложка» и технологический параметр.

*Моделирование, факельный разряд, элемент конструкции радиоаппаратуры, взаимодействие, математическая модель.*

В настоящее время в микроэлектронной технологии находят широкое применение эрозионные методы обработки тонких и толстых пленок. Весьма перспективным методом обработки, в первую очередь с целью обеспечения требуемой точности номиналов элементов, является метод факельного разряда [1,2].

Однако в литературе не описаны математические модели взаимодействия такого разряда с тонкой и толстой резистивной пленкой, необходимые для нахождения оптимальных режимов и автоматизации процесса подгонки.

В данной работе проведено исследование взаимодействия высокочастотного факельного разряда (ВЧФР) с толстой резистивной пленкой, на основе которого получена требуемая математическая модель.

Известно, что высокочастотный факельный разряд имеет вид тонкого яркого шнура, окруженного менее яркой оболочкой, поэтому большое количество энергии, передаваемое таким разрядом пленке, вызывает сильный перегрев на локальном участке последней. Введенная в пленку энергия расходуется на проплавление материала на заданную глубину, на удаление объема вещества, занимаемого каналом, плавление приканальной области материала и отвод тепла в периферийные участки в течение времени действия источника энергии.

Примем следующую физическую модель: при воздействии факельного разряда на толстую резистивную пленку 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 рис.1. 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, расходуется не только на плавление, но и отводится теплопроводностью вглубь материала пленки, поэтому для увеличения достоверности результатов учтём 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.

Для данной модели удобно применить цилиндрическую систему координат. Ось  $Z$  системы совместим с осью высокочастотного факельного разряда, направленной перпендикулярно плоскости поверхности пленки. За положительное направление оси выберем направление распространения разряда. Точку начала координат совместим с острием электрода. Эта система удобна уже тем, что ни одна из физических характеристик в этом случае не зависит от угла  $\theta$ . Очевидно, что длина канала факельного разряда во время воздействия на толстую резистивную пленку меньше, чем в свободном пространстве, так как часть мощности разряда уходит в пленку и подложку. Запишем:

$$P_p = P_\phi - P_{nl} - P_{nd}, \quad (1)$$

где  $P_p$  — мощность разряда на участке реального существования факела;  $P_\phi$  — полная мощность факельного разряда;  $P_{nl}$ ,  $P_{nd}$  — мощности, расходуемые соответственно в пленку и подложку.

Для оценки  $P_p$  воспользуемся выражениями из [3], откуда следует, что

$$P_p = P_\phi e^{-\frac{2\sqrt{\omega v}}{\sqrt{5\omega_{Le}r_k} Z_1} \left( 1 - e^{-\frac{2\sqrt{\omega v}}{\sqrt{5\omega_{Le}r_k} \Delta z} \right)}, \quad (2)$$

где  $\omega$  — внешняя частота;  $v$  — частота столкновений заряженных частиц с нейтралами в зоне канала факела;  $\omega_{Le}$  — ленгмюровская частота электронов при соответствующей плотности заряженных частиц в канале;  $r_k$  — радиус канала;  $Z_1$  — любое фиксированное значение  $Z$ ;  $\Delta z$  — изменение  $Z$  в сторону распространения разряда.

Для определения  $r_k$  воспользуемся формулами из [4]:

$$r_k = \frac{4}{E} \sqrt{\frac{2\lambda_\phi}{a\sigma}}, \quad (3)$$

$$\text{где } E = \frac{8\pi\lambda_\phi}{aI_k}. \quad (4)$$

Здесь  $\lambda_\phi$  — теплопроводность канала факела;  $a$  — коэффициент из представления электропроводности  $\sigma$  в виде  $be^{aT_z}$ , где  $T_z$  — температура на оси канала в точке  $z$ ;  $I_k$  — полный ток в канале.

Величину  $I_k$  можно определить из выражений, записанных в [3]. Так как

$$P_p = \frac{2\sqrt{10}}{r_k} \sqrt{\frac{v}{\omega\omega_{Le}}} I_k^2, \quad (5)$$

$$\text{то } I_k = \sqrt{\frac{r_k P_\phi}{2} \sqrt{\frac{\omega\omega_{Le}}{10v}}}.$$

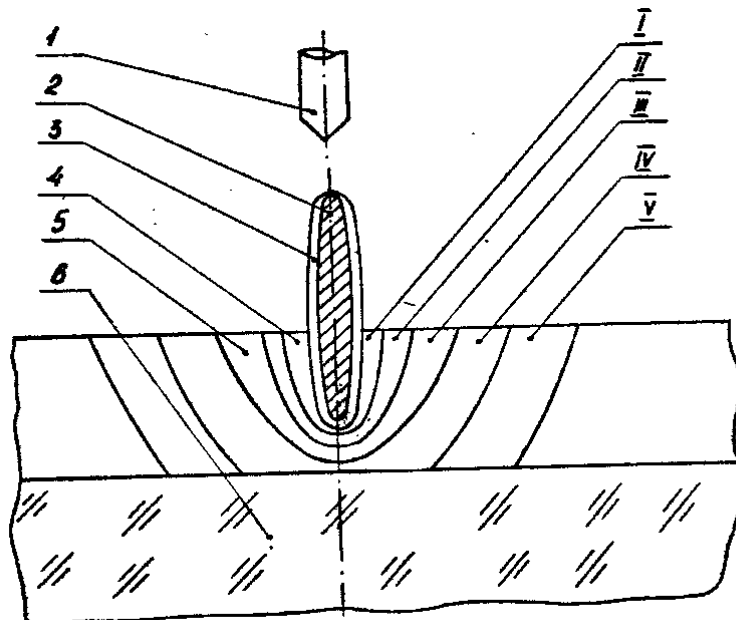


Рис. 1. Схема взаимодействия факельного разряда с толстой резистивной пленкой: 1—электрод; 2—канал факела; 3—оболочка факела; 4—кратер; 5—пленка; 6—подложка; I—V—участки резистивной пленки в зоне взаимодействия

Найдем  $r_k$  из (3) с учётом (4) и (5):

$$r_k = \frac{aP_\phi}{4\pi^2 b \lambda_\phi} \sqrt{\frac{\omega \omega_{Le}}{10\nu}} e^{-aT_\phi}, \quad (6)$$

где  $T_\phi$  — начальная температура факела.

При бесконтактном воздействии ВЧФР на толстую резистивную пленку примем  $\Delta z = l + h$ , где  $l$  — величина зазора между острием электрода и поверхностью пленки, а  $h$  — толщина пленки. Очевидно, что в нашем случае  $z_l = 0$ .

Пусть за время воздействия  $t$  испаряется участок площадью  $S_u$  с массой  $m_u$ , тогда энергия, переданная пленке:

$$Q_{nl} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (7)$$

где  $Q_1$  — количество теплоты, расходуемое на испарение вещества пленки массой  $m_u$ ;  $Q_2$  — часть  $Q_{nl}$ , идущая на нагрев в зонах I, II, III от температуры плавления  $T_n$  до температуры испарения  $T_u$ ;  $Q_3$  — часть  $Q_{nl}$ , идущая на плавление материала резистивной пленки в зонах с I по IV;  $Q_4$  — количество теплоты, расходуемое на нагрев в зонах с I по IV от температуры внешней среды  $T_0$  до точки плавления;  $Q_5$  — часть  $Q_{nl}$ , идущая на нагрев пленки в периферийной области  $V$ .

Запишем:

$$Q_1 = L_u m_u, \quad (8)$$

где  $L_u$  — удельная теплота испарения резистивного материала.

Очевидно, что

$$Q_2 = C_{nR} m_u (T_u - T_n) + C_{nR} k_{ln} m_{nn} (T_u - T_n), \quad (9)$$

где  $C_{nR}$  — удельная теплоемкость расплава;  $m_{nn}$  — масса части жидкой фазы материала пленки, находящейся в состоянии нагрева до температуры испарения;  $k_{ln}$  — коэффициент, учитывающий неравномерность нагрева участка с  $m_{nn}$  от  $T_n$  до  $T_u$ .

Аналогично имеем:

$$Q_3 = L_n (m_u + m_{nn} + k_{ln} m_n), \quad (10)$$

$$Q_4 = C_R (T_n - T_0) (m_u + m_{nn} + m_n), \quad (11)$$

где  $L_n$  — удельная теплота плавления материала резистивной пленки;  $m_n$  — масса участка пленки, находящегося в расплавленном состоянии;  $k_{ln}$  — коэффициент, учитывающий неравномерность расплава участка;  $C_R$  — удельная теплоемкость материала резистивной пленки.

Найдем  $P_5$ , соответствующую  $Q_5$ :

$$P_5 = C_R \rho_R \int_V (T_i - T_0) dV,$$

где  $\rho_R$  — плотность материала резистивной пленки.

Для нахождения  $P_5$  система кратер (локальная область взаимодействия ВЧФР с пленкой) — нагретая зона пленки рассматривается как система нагретое тело цилиндрической формы — полуограниченный массив.

Окончательное выражение для  $P_5$  имеет вид:

$$P_5 = \frac{2\pi h T_0 [C_R \rho_R (R_n - R_u)]^2 \ln \frac{4h}{R_u + R_n}}{\lambda_R - C_R \rho_R (R_n - R_u) \ln \frac{4h}{R_u + R_n}}, \quad (12)$$

где  $\lambda_R$  — теплопроводность резистивного материала;  $R_n, R_u, R_u$  — внешние радиусы соответственно V, IV, II зон.

Для нахождения  $P_{nd}$  воспользуемся результатами [5] и [6], где теплоотвод в подложку учитывался посредством введения некоторого амплитудного температурного коэффициента  $G$ , равного отношению температуры на границе системы пленка—подложка  $T_2$  к температуре адиабатически изолированной пленки  $T_1$ :

$$G = \frac{T_2}{T_1}.$$

Для нашего случая очевидно, что  $T_2 = T_u$ , а  $T_1$  равна температуре на оси канала факела в свободном пространстве в точке  $A$  с  $z = l + h$ .

Из (5) имеем:

$$G = \frac{1}{g^2 t} \left( e^{gt^2} \operatorname{erfc}(gt) + \frac{2g\sqrt{t}}{\sqrt{\pi}} - 1 \right), \quad (13)$$

$$\text{где } g = \frac{\sqrt{\lambda_2 \tau C_2 \rho_2}}{\rho_R C_R h}.$$

Здесь  $\tau$  — длительность воздействующих импульсов,  $C_2, \rho_2, \lambda_2$  — соответствующие физические коэффициенты по материалу подложки.

Мощность, уходящую в подложку, можно определить по формуле (4):

$$P_{nd} = 8\pi 10^6 E_A^{-1} \sqrt{\frac{\lambda_\phi^3}{\omega a^3}}, \quad (14)$$

где  $E_A$  — напряженность поля в точке  $A$ .

Для точки  $A$  в нашем случае уравнение теплового баланса для взаимодействующей системы согласно [4] имеет вид:

$$\operatorname{div}(\lambda_\phi \operatorname{grad} T_z) = \sigma E_A^{-1} - P_\kappa - P_{nl}, \quad (15)$$

где  $P_\kappa$  учитывает свободную конвекцию вдоль оси разряда и её радиальную составляющую на участке  $z \in [0, l]$ . Так как  $P_\kappa$  в (15) играет существенную роль лишь при принудительном продуве, то, пренебрегая  $P_\kappa$ , получим

$$\lambda_\phi T_z'' = b e^{aT_A} E_A^2 - P_{nl}. \quad (16)$$

Для того, чтобы форма канала у границы с подложкой была ближе к идеальной (цилиндрической), необходимо, чтобы изменение  $T_z$  относительно  $T_A$  при  $Z \rightarrow Z_A$  было мало. В этом случае можно принять  $T_z'' = 0$ , тогда из (16) получим

$$E_A = \sqrt{\frac{P_{nl}}{b e^{aT_A}}},$$

и выражение (14) примет вид

$$P_{nd} = 8\pi 10^6 \sqrt{\frac{b e^{aT_A} \lambda_\phi^3}{P_{nl} \omega a^3}}, \quad (17)$$

где  $T_A = \frac{T_u}{G}$ .

В связи с тем, что картина течения процесса взаимодействия в каждый момент времени определяется положением границы испаренной зоны [7], то выразим массы всех областей через  $m_u$  путём введения специальных коэффициентов.

Пусть :

$$m_{nn} = K_{nn} m_u;$$

$$m_n = K_n m_u;$$

$$m_\kappa = K_\kappa m_u.$$

Очевидно, что  $i$  —я зона является источником нагрева  $(i+1)$  зоны, поэтому воспользуемся законами теплопроводности.

Запишем:

$$Q_{ni} = Q_{nn} + Q_{n\kappa};$$

$$Q_{n\kappa} = Q_n + Q_\kappa,$$

где  $Q_{ni}$  — количество теплоты, переданное областью испарения зоне III;  $Q_{nn}$  — часть  $Q_{ni}$ , ушедшая на нагрев и фазовое изменение материала в области III;  $Q_{n\kappa}$  — количество теплоты, переданное зоной III области IV;  $Q_n$  — часть  $Q_{n\kappa}$ , ушедшая на нагрев и плавление

материала в зоне IV;  $Q_\kappa$  — количество теплоты, переданное зоне V.

Радиусы зон можно также выразить через соответствующие  $K_i$  и  $R_u$ .

Не останавливаясь на подробных выводах, запишем лишь окончательные выражения:

$$\hat{E}_{ii} = \frac{\rho_{ii} k_{ii}}{\rho_R R_\delta^2};$$

$$R_{ii} = \sqrt{k_{ii} + R_\delta^2};$$

$$\hat{E}_i = \frac{\rho_i k_i}{\rho_R R_\delta^2};$$

$$R_i = \sqrt{k_i + R_{ii}^2};$$

$$R_i = R_i + k_i,$$

где

$$k_u = \frac{A_1 + \sqrt{A_2^2 + 4\lambda_R T_0 A_2 A_1^{-1}}}{2\rho_R C_R T_0};$$

$$k_n = \frac{2\lambda_n t (T_u - T_n) (k_{nn} + R_u^2)}{\rho_n k_{nn} (L_n k_{1n} + A_3)};$$

$$k_{nn} = \frac{A_5 + \sqrt{A_5^2 - 8R_u^2 \lambda_n t_p \rho_{nn} (T_u - T_n) (k_{1nn} A_4 + A_3 + L_n)}}{\rho_{nn} (k_{1nn} A_4 + A_3 + L_n)};$$

$$A_1 = \ln \frac{4h}{R_u + \sqrt{k_n + k_{nn} + R_u^2}};$$

$$A_2 = \lambda_n (T_u - T_n) (k_{nn} + R_u^2) k_{nn}^{-1};$$

$$A_3 = C_R (T_n - T_0);$$

$$A_4 = C_{nR} (T_u - T_n);$$

$$A_5 = 2t_p \left[ \frac{\lambda_u (T_\phi - T_u) R_u^2}{R_u^2 - r_\kappa^2} - \lambda_n (T_u - T_n) \right].$$

Здесь  $\rho_i$  и  $\lambda_i$  — плотности и теплопроводности при соответствующих температурах.

Выражение (1) с учётом (2), (7)...(12) и (17) после ряда эквивалентных преобразований примет следующий вид:

$$P_\phi e^{\frac{2\sqrt{\omega v}}{\sqrt{5\omega r_\kappa}} (l+h)} = G_1 R_u^2 + G_2 + 8\pi 10^6 \sqrt{\frac{bt \lambda_\phi^3 e^{aT_u G^{-1}}}{\omega a^3 (G_1 R_u^2 + G_2)}}, \quad (18)$$

где

$$G_1 = \frac{\pi h \rho_R}{t} \left[ L_u + A_4 \left( 1 + \frac{k_{1nn} \rho_{nn}}{\rho_R R_u^2} \right) + (L_n + A_3) \left( 1 + \frac{\rho_{nn}}{\rho_R R_u^2} \right) \right] +$$

$$+ \frac{\pi h \rho_R}{t} (L_n k_{1n} + A_3) \sqrt{k_n + k_{nn} + R_u^2};$$

$$G_2 = \frac{2\pi h T_0 (C_R \rho_R k_n)^2 A_1}{\lambda_R + C_R \rho_R k_n A_1},$$

где  $r_\kappa$  определяется по (6),  $G$  по (13), а остальные выражения приведены выше итогового.

Особенность полученного выражения (18) в том, что оно связывает все физические и геометрические параметры системы ВЧФР—пленка—подложка и технологический параметр  $l$ .

Используя полученное выражение, можно найти зависимости различных параметров от всей совокупности параметров взаимодействующей системы.

Так, разрешив (18) относительно  $l$ , можно найти зависимость величины зазора  $l$  от  $R_u$  или  $P_\phi$  при фиксированных значениях остальных параметров, что представляет большой интерес при исследовании вопроса подгонки толстоплёночных резистивных элементов высокочастотным факельным разрядом бесконтактным методом.

#### Библиографический список

1. Чернобровкин, Д. И. Прибор для подгонки тонкоплёночных элементов микросхем [Текст] / Д. И. Чернобровкин, Н. Д. Мишанин, М. Н. Пиганов и др. // Приборы и системы управления.- 1978.- №6.- С. 45—46.
2. Пиганов, М. Н. Подгонка сопротивления толстоплёночных резисторов методом факельного разряда [Текст] / М. Н. Пиганов, А. В. Волков // Техника средств связи. Сер.

«Технология производства и оборудование».- 1985. № 2.- С. 29—35.

3. Качанов А. В. Электродинамическое описание высокочастотного разряда [Текст] / А. В. Качанов, Е. С. Трехов, Е. П. Фетисов // Физика газоразрядной плазмы. —М.: Атомиздат, 1968. Вып. I. С. 39—47.

4. Трехов Е. С. К теории высокочастотного факельного разряда в воздухе [Текст] / Е. С. Трехов, Е. А. Тюрин, Е. П. Фетисов // Физика газоразрядной плазмы. — М.: Атомиздат, 1969. Вып. 2. С. 148—155.

5. Вейко В. П. К расчету термических искажений рисунка при лазерной обработке тонких пленок [Текст] / В. П. Вейко // Физика и химия обработки материалов.- 1980. № 5. С. 37—43.

6. Либенсон М. Н. О термических искажениях рисунка при обработке пленок воздействием ОКГ [Текст] / М. Н. Либенсон, М. Н. Никитин // Физика и химия обработки материалов.- 1970.- №5.- С. 9—13.

7. Анисимов, С. И. Действие излучений большой мощности на металлы [Текст] / С. И. Анисимов, Я. А. Имас, Г. С. Романов, Ю. В. Ходыко. — М.: Наука, 1970. — 272с.

## MATHEMATICAL MODELING OF INTERACTION A HIGH-FREQUENCY TORCH DISCHARGE WITH CONSTRUCTION ELEMENTS OF RADIO EQUIPMENT

© 2011 A. V. Kostin, M. H. Piganov, A. V. Stolbikov

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

In this article spent mathematical modeling of interaction a high-frequency torch discharge with design elements of radio equipment type «a thick resistive film». Researchers have explored interaction of torch discharge with film structures. Mathematical expression, which relates all physical and geometrical parameters of system "discharge-film-substrate" and technological parameter, is gained.

*Modeling, torch discharge, design element of radio equipment, interaction, mathematical model.*

#### Информация об авторах

**Костин Алексей Владимирович**, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [xpehbam27@yandex.ru](mailto:xpehbam27@yandex.ru). Область научных интересов: повышение устойчивости бортовой аппаратуры космических аппаратов к внешним воздействующим факторам.

**Пиганов Михаил Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [piganov@ssau.ru](mailto:piganov@ssau.ru). Область научных интересов: надёжность и качество радиоэлектронных средств.

**Столбиков Александр Владимирович**, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Область научных интересов: точность тонкоплёночных микросборок.

**Kostin Aleksei Vladimirovich**, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [xpehbam27@yandex.ru](mailto:xpehbam27@yandex.ru). Research interests: increasing the stability of the onboard equipment of spacecraft to external factors.

**Piganov Mikhail Nikolaevich**, doctor of technical sciences, professor, head of design and production of radio-electronic means, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: [piganov@ssau.ru](mailto:piganov@ssau.ru). Research interests: quality and reliability of radio electronic equipment.

**Stolbikov Aleksandr Vladimirovich**, post-graduate student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [kipres@ssau.ru](mailto:kipres@ssau.ru). Research interests: the accuracy of thin-film micro.