

УДК 621.382.049.77

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
ТЕРМОСТАБИЛЬНЫХ РЕЗИСТИВНО-ЕМКОСТНЫХ СТРУКТУР**

© 2011 А. И. Меркулов, П. В. Лактанов, В. А. Меркулов

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

С использованием математических методов планирования экстремальных экспериментов получена регрессионная модель второго порядка техпроцесса изготовления тонкоплёночных резистивно-ёмкостных структур. Определены технологические параметры, при которых температурный коэффициент постоянной времени структуры будет равен нулю.

*Математическая модель, резистивно-ёмкостные структуры, априорное ранжирование, симплекс-метод, факторный эксперимент.*

В связи с трудностью создания малогабаритных индуктивных элементов для схем, работающих на низких частотах, внимание исследователей всё больше привлекают частотно-избирательные схемы на основе RC-элементов, в частности, на основе тонкоплёночных RC-структур с распределёнными параметрами.

Резистивно-ёмкостные элементы с распределёнными параметрами представляют собой системы чередующихся слоев (полосок) материалов, в которых проводящие и/или резистивные слои разделены диэлектрическими слоями (или двойными заряженными слоями с электронной или ионной проводимостью) [1]. К частотно-избирательным схемам предъявляется требование высокой стабильности при работе в диапазоне температур. Отклонение частоты RC-фильтров от номинальной при изменении температуры окружающей среды зависит от соответствующих изменений величины сопротивления и ёмкости RC-структуры, которые, в свою очередь, зависят от множества технологических факторов, действующих в процессе изготовления RC-структуры.

В основу изучения стабильности RC-структур следует положить изучение их температурных характеристик, которые определяются свойствами тонких плёнок, напыляемых при изготовлении RC-структур. Такими характеристиками могут быть температурный коэффициент сопротивления  $\alpha_R$  – для резисторов и температурный коэффициент ёмкости  $\alpha_C$  –

для ёмкостей RC-структур. Естественным является стремление изготавливать RC – структуры таким образом, чтобы их  $\alpha_R$  и  $\alpha_C$ , а следовательно и  $\alpha_{RC}$  (температурный коэффициент постоянной времени), были равны нулю. Ниже приведены результаты исследований, позволяющие выбирать режимы техпроцесса, на основе которых можно получить термостабильные RC-структуры и частотно-избирательные схемы.

С целью получения адекватной математической модели техпроцесса изготовления RC-структур применены методы планирования экстремальных экспериментов. В качестве функции цели, иначе – критерия оптимизации, выбрано нулевое значение  $\alpha_{RC}$ . В качестве независимых переменных на основании изучения литературных данных и опроса специалистов выбираем следующие показатели (табл. 1). В таблице указаны также уровни варьирования показателей. Для априорного ранжирования факторов с целью выделения наиболее существенных из них проведён опрос специалистов. Степень согласованности мнений всех исследователей оценивался с помощью коэффициента конкордации  $W$ , величина которого равна 0,74. Можно считать, что между мнениями исследователей имеется существенная связь. На рис.1 представлен результат ранжирования независимых переменных (факторов).

При проведении отсеивающих экспериментов методом случайного баланса выделены

три фактора, которые учитывались в дальнейшей работе:  $x_5$  – скорость испарения материала диэлектрика ( $V_{SiO}$ );  $x_2$  – скорость испарения резистивного материала ( $V_{Cr}$ );  $x_3$  – толщина пленки хрома ( $\Delta Cr$ ). Остальные факторы были зафиксированы на определенных уровнях: степень вакуума определялась возможностью вакуумной установки –  $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст., толщина пленки диэлектрика и скорость испарения материала обкладки RC-структуры в дальнейшем поддерживались на постоянном уровне: 4000 Å/с и 20 Å/с соответственно.

Нахождение области оптимума осуществлялось с помощью факторного анализа. Для получения уравнения регрессии был поставлен полный факторный эксперимент типа  $2^3$ . Гипотеза об адекватности представления результатов исследования полиномом первой степени проверялась с помощью критерия Фишера. Так как табличное значение  $F$ -критерия оказалось меньше опытного ( $F_{0,05}=2,37$ ), гипотезу об аде-

кватности линейного приближения нельзя считать верной. Поэтому в дальнейшем осуществлялась аппроксимация рассматриваемой поверхности отклика полиномом второй степени. Для нахождения области оптимума использовался один из рациональных методов поиска экстремума функции нескольких переменных – симплекс-планирование.

Результаты, полученные на основе симплекс-планирования, проверялись с помощью метода крутого восхождения. Определено, что оптимальным является такой режим напыления тонкопленочных RC-структур с распределенными параметрами, при котором толщина резистивной плёнки имеет значения 250...300 Å, скорость испарения  $SiO$  – 8...9 Å/с., скорость испарения  $Cr$  – 8...9 Å/с.

Для описания поверхности отклика уравнением второго порядка независимые переменные варьировались на трёх уровнях.

Таблица 1. Факторы технологического процесса

Независимые переменные	-1	+1
$X_1$ - степень вакуума при испарении хрома, мм рт. ст.	$10^{-4}$	$10^{-5}$
$X_2$ - скорость напыления хрома, Å/с	3	10
$X_3$ - толщина пленки хрома, Å	200	400
$X_4$ - степень вакуума при испарении SiO, мм рт. ст.	$10^{-4}$	$10^{-5}$
$X_5$ - скорость нанесения SiO, Å/с	5	20
$X_6$ - толщина пленки SiO, Å	2000	3000
$X_7$ - скорость нанесения материала верхней обкладки (Al), Å/с	20	30

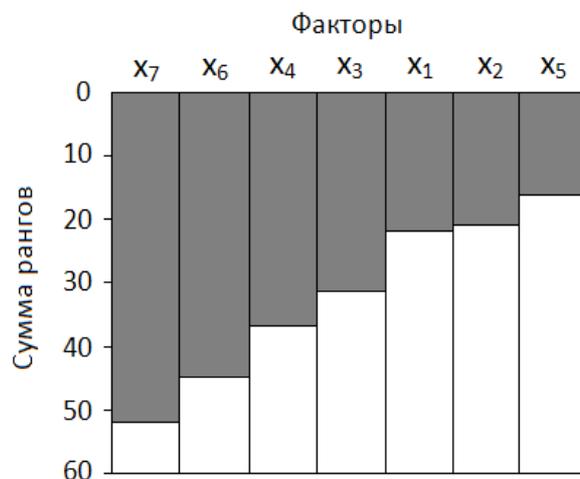


Рис. 1. Средняя априорная диаграмма рангов при изучении зависимости  $\alpha_{RC}$  RC-структуры от условий её изготовления

При описании почти стационарной области наиболее эффективным считается центральное композиционное ротатабельное планирование второго порядка [2]. Планирование является композиционным, т.к. оно основано на достраивании линейной модели (полного факторного эксперимента или дробной реплики) до плана второго порядка. Для этого к «ядру», образованному при движении в область оптимума, добавлялись несколько «звёздных» и «нулевых» точек. Планирование является центральным, т.к. оно симметрично относительно центра.

Расстояние от «нулевой» точки до «звёздной» (величина звёздного плеча) определялось по формуле  $\alpha = 2^{k/4}$ , где  $k$  – число показателей. В нашем случае  $\alpha = 2^{3/4} = 1,682$ .

После расчёта коэффициентов регрессии получено уравнение

$$y = 0,649 + 0,961x_1 + 0,365x_2 + 0,446x_3 - 0,0388x_1x_2 - 0,0113x_1x_3 - 0,0788x_2x_3 + 0,02x_1^2 + 0,005x_2^2 - 0,001x_3^2. \quad (1)$$

Здесь  $y$  – параметр оптимизации ( $\alpha_{RC}$ );  $x_1, x_2, x_3$  – независимые переменные. В связи с тем, что  $F_{0,05} = 5,05$ , гипотезу об адекватности представления уравнения регрессии полиномом второго порядка можно считать верной с 95% достоверностью.

Для облегчения практических расчётов и интерпретации установленных закономерностей уравнение (1) преобразуем с введением именованных величин:

$$\alpha_{RC} \cdot 10^4 \text{ 1/град} = 0,534V_g + 0,641V_p + 0,0291d - 0,0097V_gV_p - 0,000188V_gd - 0,001313V_p d + 0,005V_g^2 + 0,00125V_p^2 - 0,000011d^2 - 14,203, \quad (2)$$

где  $V_g$  – скорость нанесения диэлектрической плёнки;  $V_p$  – скорость нанесения резистивной плёнки;  $d$  – толщина резистивной плёнки.

Для изучения поверхности отклика, соответствующей в области эксперимента уравнению (2), сделаем каноническое преобразование этого уравнения к стандартному виду.

В итоге получаем следующее каноническое уравнение:

$$y - 1,79 = 0,0479x_1^2 - 0,0419x_2^2 + 0,02x_3^2. \quad (3)$$

С учётом классификации поверхностей второго порядка установим вид поверхности отклика. Рассматриваемая поверхность относится к типу минимакса и имеет вид двухполо-

стного гиперboloида (рис. 2) с центром, находящимся вне области эксперимента. Сечения поверхности отклика плоскостями  $X_1S X_2$  и  $X_1S X_3$  могут быть представлены уравнениями гипербол, для которых ось  $X_1$  является действительной осью. Область эксперимента находится в верхней полости гиперboloида, её сечения плоскостями  $X_2S X_3$  являются эллипсами.

Для изучения поверхности отклика в области эксперимента построены некоторые её двумерные сечения с контурными линиями, соответствующими определенным значениям критерия оптимизации (рис. 3).

Рассмотрим сечение  $x_3 = 0$  (для резистивной плёнки толщиной  $300\text{\AA}$ ). Подставляя значение  $x_3 = 0$  в уравнение регрессии, получим  $y = 0,649 + 0,96x_1 + 0,365x_2 - 0,039x_1x_2 + 0,02x_1^2$ . (4)

В каноническом представлении это уравнение имеет вид:

$$y - 19,547 = 0,03276x_2^2 - 0,008156x_1^2. \quad (5)$$

На основании уравнения (5) после подстановки в него различных значений  $\alpha_{RC}$  получаем уравнения соответствующих контурных кривых – гипербол, в совокупности представляющих целое семейство сопряженных гипербол (линий равных значений  $\alpha_{RC}$ ).

Данное двумерное сечение приведено на рис. 4. Из рисунка видно, что минимальное (нулевое) значение  $\alpha_{RC}$  для резистивной плёнки RC - структуры, имевшей толщину  $300\text{\AA}$ , может быть достигнуто при варьировании скорости испарения материала диэлектрика и скорости испарения резистивного материала в следующих пределах:

$$V_{sio} = 1 \dots 9 \text{ \AA/c}; V_{Cr} = 20 \dots 1 \text{ \AA/c}.$$

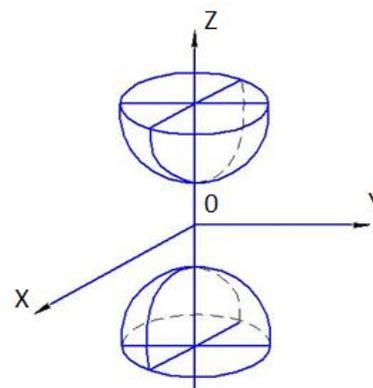


Рис. 2. Двухполостный гиперboloид

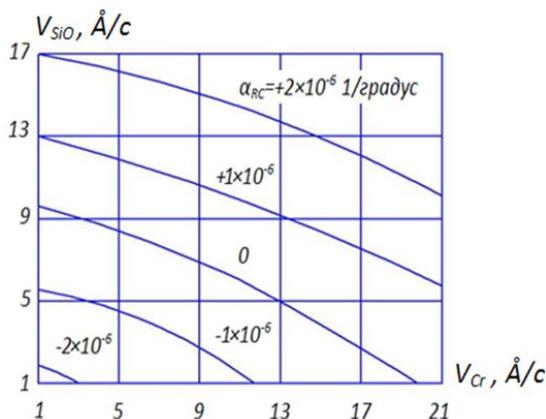


Рис. 3. Двухмерное сечение:  $\Delta Cr = 300 \text{ \AA}$

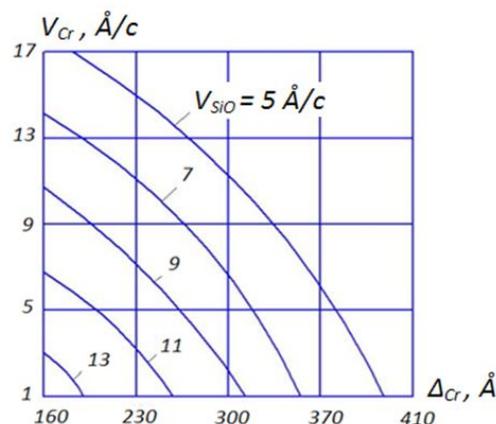


Рис. 4. Сечение поверхности отклика при  $\alpha_{RC} = 0$

Получены также сечения  $x_I = +1; +0,5; 0; -0,5; -1$  для  $\alpha_{RC} = 0$ , позволяющие выбирать необходимые сочетания  $V_{Cr}$  и  $\Delta Cr$  при разных скоростях напыления диэлектрика. Из графиков видно, что возможность получения нулевых значений  $\alpha_{RC}$  уменьшается (в пределах условий эксперимента) с увеличением скорости напыления диэлектрика.

Таким образом, подученная математическая модель позволяет определять рациональные режимы изготовления RC-структур с распределенными параметрами, имеющих как нулевое (оптимальное) значение температурного

коэффициента постоянной времени, так и любое требуемое значение.

#### Библиографический список

1. Гильмутдинов, А. Х. Резистивно-емкостные элементы с распределенными параметрами: анализ, синтез и применение [Текст] / А. Х. Гильмутдинов. - Казань: Казан. гос. техн. ун-т. - 2005. - 151с.
2. Фрактальные элементы и радиосистемы: Физические аспекты. Монография / Под ред. А. А. Потапова. - М.: Радиотехника, 2009. - 200с. Серия «Фракталы. Хаос. Вероятность». Редактор А. А. Потапов).

## MATHEMATICAL MODELING OF TECHNOLOGICAL PRODUCTION PROCESS OF THERMO-STABLE RESISTOR – CAPACITY STRUCTURES

© 2011 A. I. Merkulov, P. V. Laktanov, V. A. Merkulov

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

Regression model of the second order of technical processes of the thin-film resistor-capacity structures production with application of mathematical planning methods of extreme experiments has been developed. Technological parameters at which the temperature ratio of constant time structure is equal to zero have been determined.

*Mathematical model, resistor-capacity structures, priori ranging, simplex-method, factor experiment.*

#### Информация об авторах

**Меркулов Анатолий Игнатьевич**, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, к.т.н., Самарский государственный аэрокосмиче-

ский университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail [aimerk@yandex.ru](mailto:aimerk@yandex.ru). Область научных интересов: микроэлектроника.

**Лактанов Павел Владимирович**, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail [pavellaktanov@gmail.com](mailto:pavellaktanov@gmail.com). Область научных интересов: авиация.

**Меркулов Владимир Анатольевич**, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), инженер отдела информатизации и телекоммуникаций. E-mail: [mva005@mail.ru](mailto:mva005@mail.ru). Область научных интересов: информационные технологии.

**Merkulov Anatoly Ignatiyevich**, associate professor of designing and production of radio-electronic equipment department, Ph.D., Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail [aimerk@yandex.ru](mailto:aimerk@yandex.ru). The field of scientific interests: microelectronics.

**Laktanov Pavel Vladimirovich**, a student, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail [pavellaktanov@gmail.com](mailto:pavellaktanov@gmail.com). The field of scientific interests: aviation.

**Merkulov Vladimir Anatoliyevich**, post-graduate students, engineer of information and telecommunication department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail [mva005@mail.ru](mailto:mva005@mail.ru). The field of scientific interests: information techniques.