

1. Зеленский В.А. Волоконно-оптическая информационно-измерительная система на основе бинарных оптомеханических датчиков дифференциального типа. Материалы международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза, 25 – 31 мая, 2009. т. I. - С. 35-37.
2. Голубятников И.В., Зеленский В.А., Шатерников В.Е. Системы мониторинга сложных объектов. – М.:Машиностроение, 2009. – 172 с.
3. Зеленский В.А., Гречишников В.М. Бинарные волоконно-оптические преобразователи в системах управления и контроля.- Самара: Самарский научный центр РАН, 2006. - 120 с
4. Зеленский В.А. Бинарный волоконно-оптический датчик перемещений с кодовым выходом для систем автоматического контроля. // Контроль, диагностика. – 2009, № 7. – С.15-17.
5. Зеленский В.А. Бинарный оптомеханический датчик реверсивных перемещений с кодирующим элементом. // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Тулолева. – 2009, № 3. - С 51-52.
6. Зеленский В.А. Метод оценки количества информации при изменении модели объекта управления. // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», 2009,. № 1 (23). - С. 95 – 98.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕРМОСТАБИЛЬНЫХ RC-СТРУКТУР С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

А.И. Меркулов, П.В. Лактанов, В.А. Меркулов
Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

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

Резистивно-емкостные элементы с распределенными 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). 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 емкости 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 пленок, напыляемых при изготовлении RC-структур. Такими характеристиками могут быть температурный коэффициент сопротивления α_R – для резисторов и температурный коэффициент емкости α_c – для емкостей RC-структур. Естественным является стремление изготавливать RC-структуры таким образом, чтобы их α_R и α_c , а, следовательно, и α_{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 α_{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 проведен 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).

Таблица 1

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



Рис. 1. Средняя априорная диаграмма рангов при изучении зависимости α_{RC} RC-структуры от условий ее изготовления

В дальнейшем 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 (ΔCr). Остальные факторы были зафиксированы на определенных уровнях: например, 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 \AA и 20 \AA/сек 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 ($F_{0,05}=2,37$) меньше опытного, гипотезу об адекватности 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 пленки имеет значения $250-300 \text{ \AA}$, скорость испарения SiO – $8-9 \text{ \AA/сек.}$, скорость испарения Cr – $8-9 \text{ \AA/сек.}$

Для описания поверхности отклика уравнением второго порядка независимые переменные варьировались на трех уровнях. При описании

почти стационарной области наиболее эффективным считается центральное композиционное ротатбельное планирование второго порядка. 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 «звездных» и «нулевых» точек. Планирование является центральным, т.к. оно симметрично относительно центра. Расстояние от «нулевой» точки до «звездной» (величина звездного плеча) определялось по формуле $\alpha=2^{k/4}$, где k – число показателей. В нашем случае $\alpha=2^{3/4}=1,682$.

После расчета 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 (α_{RC}); x_1, x_2, x_3 – независимые переменные. В связи с тем, что $F_{с,05} = 5,05$, гипотезу об адекватности представления уравнения регрессии полиномом второго порядка можно считать верной с 95% достоверностью.

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

$$\alpha_{RC} \cdot 10^{-4} / \text{Град} = 0,534V_g + 0,641V_p + 0,0291d - 0,0097V_gV_p - 0,000188V_gd - 0,001313V_p d + 0,005V_g^2 + 0,00125V_p^2 - 0,0000011d^2 - 14,203, \quad (2)$$

где V_g – скорость нанесения диэлектрической пленки, V_p – скорость нанесения резистивной пленки, d – толщина резистивной пленки.

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 учетом классификации поверхностей второго порядка установим вид поверхности отклика. Рассматриваемая поверхность относится к типу минимакса и имеет вид двухполостного гиперболоида (рис. 2) с центром, находящимся вне области эксперимента. Сечения поверхности отклика плоскостями $X_{2,5}X_2$ и $X_{1,5}X_3$ могут быть представлены уравнениями гипербол, для которых ось X_1 является действительной осью. Область эксперимента

находится в верхней полости гиперboloида, ее сечения плоскостями $X_{25}X_3$ являются эллипсами.

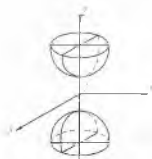


Рис. 2. Двухполостный гиперboloид

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

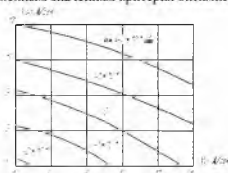


Рис. 3. Двухмерное сечение, $\Delta Cr = 300\text{\AA}$

Рассмотрим сечение $x_3 = 0$ (для резистивной пленки толщиной 300\AA). Подставляя значение $x_3 = 0$ в уравнение регрессии, получим:

$$y = 0,649 + 0,961x_2 + 0,365x_2 - 0,0388x_2 x_2 + 0,02x_1^2. \quad (4)$$

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 α_{RC} получаем уравнения соответствующих контурных кривых – гипербол, в совокупности представляющих целое семейство сопряженных гипербол (линий равных значений α_{RC}).

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

$$V_{\text{диэ}} = 1 \text{ \AA/сек} - 9 \text{ \AA/сек},$$

$$V_{\text{Cr}} = 20 \text{ \AA/сек} - 1 \text{ \AA/сек}.$$

Получены также сечения $x_2 = +1; +0,5; 0; -0,5, -1$ для $\alpha_{RC}=0$, позволяющие выбирать необходимые сочетания V_{Cr} и $\Delta C\tau$ при разных скоростях напыления диэлектрика. Из графиков видно, что возможность получения нулевых значений α_{RC} уменьшается (в пределах условий эксперимента) с увеличением скорости напыления диэлектрика.

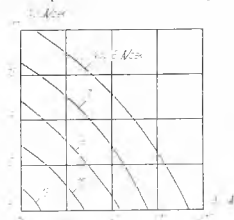


Рис. 4 Сечение поверхности отклика при $\alpha_{RC} = 0$

Таким образом, полученная математическая модель позволяет находить рациональные режимы изготовления RC-структур с распределенными параметрами, имеющих как нулевое (оптимальное) значение температурного коэффициента постоянной времени, так и любое требуемое значение.