

а) б)  
Рисунок 3 – Результат применения метода нечеткой кластеризации:  
а – рис. 1, а; б – рис. 1, б

результатов диагностики посредством, например, варьирования числа классов.

### ВЫВОДЫ

Нечеткая кластеризация является достаточно простым и удобным методом повышения эффективности процедуры визуального анализа ультразвуковых медицинских эхо-импульсных изображений. Необходимым условием успешного применения метода нечеткой кластеризации является нейтрализация влияния модуляци-

онных шумов. Метод селективного сингулярного разложения автоморфного отображения зашумленных изображений является эффективным способом фильтрации модуляционных шумов, поскольку не требует априорного знания их спектральных и статистических характеристик.

### ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Физика визуализации изображений в медицине. Под ред. С. Уэбба. – М.: Мир. – 1991. – Т. 2. – 406 с.
2. Ахметшин А. М., Степаненко А. А. Повышение чувствительности ультразвуковой диагностики на основе метода параметрического спектрального анализа второго порядка. // Харьков: Клиническая информатика и телемедицина. – 2005. – Т. 2, № 1. – С. 98–100.
3. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение: современный подход. – М.: Вильямс. – 2004. – 926 с.
4. Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург. – 2003. – 719 с.
5. Hall L. O., Bensaid A., Clarke L. P. A comparison of neural network and fuzzy clustering techniques in segmentation MRI of the brain // IEEE Trans. On Neural Networks. – 1992. – Vol. 3. – P. 672–682.
6. Применение ультразвука в медицине. Под ред. К. Хилла. – М.: Мир. – 1989. – 567 с.
7. Karatan M., Kutay A., Bozdagi G. An adaptive speckle suppression filter for medical ultrasonic imaging // IEEE Transaction on Medical Imaging. – 1995. – Vol. 14, No. 2. – P. 283–292.
8. Ахметшина Л. Г. Адаптивная фильтрация шумов в сигналах и изображениях: метод селективного сингулярного разложения автоморфного отображения // Искусственный интеллект. – 2005. – № 3. – С. 328–335.

Надійшла 24.03.2008

*Розглянуто новий підхід до підвищення ефективності процедури візуального аналізу ультразвукових медичних ехо-імпульсних зображень. Представлено результати експериментальної перевірки інформаційних можливостей методу.*

*A new approach to increasing efficiency of visual analysis ultrasonic medical pulse-echo image is considered. Results experimental investigation information possibilities of the new method are presented.*

УДК 621.382.002

И. М. Прохорец

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

*На основании теории направленных графов рассмотрены математические модели стрип-детектора для измерения межстриповых сопротивлений на постоянном токе. Приведены примеры расчета совместных линейных уравнений для электрических цепей, используемых для измерения межстриповых сопротивлений.*

© Прохорец И. М., 2008

### ВВЕДЕНИЕ

Многоэлементные полупроводниковые детекторы, к которым относятся полосковые или стрип-детекторы, пиксельные детекторы, относятся к приборам, получив-

ших наибольшее распространение в спектрометрии и визуализации изображений из-за их высокого пространственного разрешения, малого уровня шумов и наличия хорошо отработанной технологии. Для кремниевых стрип-детекторов существует целый ряд критических параметров, определяющих их характеристики – амплитудное, временное и пространственное разрешение. К ним относятся межстриповая емкость и емкость стрипа относительно противоположной плоскости [1], напряжение полного обеднения обратносмещенных  $p-n$  переходов и их обратный ток, межстриповое сопротивление и т. д. Непосредственное измерение характеристик стрип-детектора затруднено из-за многих факторов: шаг внешних электродов находится в диапазоне 25–100 мкм; емкости малы по величине и не всегда допускают прямое измерение; сопротивления большие и их невозможно измерить без отключения от исследуемого объекта. Усложняет ситуацию и тот факт, что модуль детектора обычно работает в полях излучения, содержащих нейтроны, гамма-кванты и заряженные частицы. Действие излучения приводит к изменению внутренней структуры полупроводника. Следствием этих изменений является увеличение тока утечки  $p-n$  переходов [2]

$$\Delta I_{\text{lead}}^{\text{rad}} = \alpha_{\text{rad}} \Phi_{\text{rad}},$$

где  $\Phi_{\text{rad}}$  – поток излучения, а коэффициент  $\alpha_{\text{rad}}$  равен  $(2-3) \cdot 10^{-17}$  А·см<sup>-2</sup> для заряженных частиц и  $(5-8) \times 10^{-17}$  А·см<sup>-2</sup> для нейтронов [2].

Конструктивно кремневые стрип-детекторы состоят из отдельных обратносмещенных  $p-n$  переходов, емкостей и интегрированных сопротивлений смещения последних. Имитационное моделирование методики измерения емкостей детектора проведено в работах отечественных [1] и зарубежных авторов [3, 4].

Целью настоящей работы является создание математических моделей кремниевого детектора для измерения его характеристик на постоянном токе. Необходимость в этом возникает и при моделировании влияния поверхностных токов утечки в обычном планарном или стриповом детекторе на основе широкозонных полупроводниковых материалов CdTe, CdZnTe и др.

Практическая ценность работы определяется необходимостью создания полупроводниковых детекторов для дозиметрии и измерения полей ионизирующего излучения.

### **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КРЕМНИЕВЫХ СТРИП- ДЕТЕКТОРОВ**

Как было показано в работе [1], для построения математической модели детектора, состоящего из отдель-

ных обратно смещенных переходов, интегрированных сопротивлений смещения последних и емкостей, можно использовать направленные графы [5–9]. В этой работе для анализа схем для измерения статических параметров многоэлементных детекторов была также использована теория графов.

В направленном графе каждая ветвь  $V_{ij}$  соответствует двухполюсному базовому элементу модели – межстриповому сопротивлению, сопротивлению смещения или источнику напряжения. Направление  $V_{ij}$  совпадает с направлением действия на этом элементе фазовой переменной – тока или напряжения. Каждая вершина графа  $S_{ij}$  является точкой соединения двух или более базовых элементов и соответствует узлу модели. Ветвь называют инцидентной вершине, если она начинается или заканчивается в этой вершине. Используя идентичность, информация о графе в вычислительной машине представляется в виде матрицы инцидентий [1] с  $S = (m + 1)$  вершинами и  $V = n$  ветвями. Основной особенностью матрицы инцидентий является то, что она позволяет записать законы Кирхгофа для токов и напряжений в электрической цепи, выраженные через матрицу главных сечений  $D$  и матрицу главных контуров  $B$  [7]. Если электрическая цепь состоит из  $n$  ветвей и  $m + 1$  узлов, то ее граф содержит  $m$  ребер и  $n - m$  хорд. Для связного графа с  $m + 1$  узлами и  $n$  ветвями максимальное количество линейно-независимых строк  $M$  матрицы  $B$  равно  $M = n - m$  [8].

Любая матрица главных контуров может быть разделена на две подматрицы  $B = [B_t 1]$ , где  $B_t$  соответствует ветвям дерева, а единичная матрица  $1$  порядка  $n - m$  соответствует хордам. Если в цепи есть независимые источники напряжения, то их также включают в матрицу главных контуров  $B$ , которую в данном случае называют дополненной и обозначают  $B_d$ . Матрица  $B_d$  может быть разделена на следующие подматрицы  $B_d = [B_E B]$ , где  $B_E$  соответствует независимым источникам напряжения.

### **АНАЛИЗ СХЕМ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТЕКТОРОВ**

Межстриповое сопротивление и сопротивление смещения стрип-детектора обычно измеряют на постоянном токе. Для измерения межстрипового сопротивления собирается схема, состоящая из основного источника смещения детектора  $e_1$  и дополнительного источника  $e_2$ , подключенного к стрипу, оторванного от основного источника смещения (рис. 1).

В качестве ребер графа этой схемы необходимо взять ветви, соответствующие источникам смещения. Граф для схемы измерения межстриповых сопротивлений содержит 3 узла и 7 ветвей. Следовательно, макси-

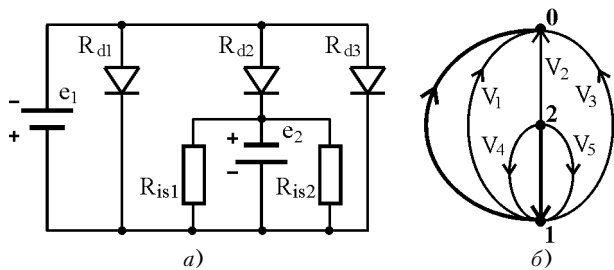


Рисунок 1 – Эквивалентная схема (а) и граф (б) для измерения межстрипового сопротивления с «оторванным» стрипом:

$R_d$  – сопротивление обратно смещенного p-n перехода

Матрица	Контур	Ветви									
		$e_1$	$e_2$	$V_1$	$V_8$	$V_2$	$V_3$	$V_3$	$V_5$	$V_6$	$V_7$
$B_D$	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
	2	0	-1	-1	0	0	1	0	0	0	
	3	1	-1	0	0	0	0	1	0	0	
	4	0	1	0	1	0	0	0	1	0	
	5	0	1	0	1	0	0	0	0	1	
	6	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1

### РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СТРИП-ДЕТЕКТОРОВ

Для определения численных параметров элементов детектора необходимо решить систему совместных линейных уравнений, выражающую в матричном виде второй закон Кирхгофа для электрической цепи:

$$B_D V = 0, \quad (1)$$

где  $V$  – вектор напряжений на ветвях графа. Для составления системы уравнений исследуемой цепи по методу контурных токов можно предположить, что напряжение на каждом пассивном элементе  $V_B$  выражается через его сопротивление  $Z_B$  и протекающий через него ток  $I_B$  в виде

$$V_B = Z_B I_B. \quad (2)$$

Тогда для всей цепи это соотношение можно записать в матричной форме

$$V_B = Z_B I_B, \quad (3)$$

где  $Z_B$  – диагональная матрица сопротивлений,  $I_B$  и  $V_B$  – векторы токов и напряжений, соответственно. Как показано в [6–9], токи  $I_X$ , протекающие через хорды, можно найти из системы уравнений

$$B Z_B B^t I_X = -B_E B_B, \quad (4)$$

где  $E_B$  – вектор известных источников напряжений в контурах. В свою очередь, вектор токов  $I_E$ , протекающих через источники напряжения, и вектор токов  $I_B$  можно найти из соотношений [6–9]

$$I_E = B_E^t I_X, \quad I_B = B^t I_X. \quad (5)$$

В качестве примера рассмотрим матрицу  $B_D$ , описывающую схему для измерения межстрипового сопротивления (рис. 3). Матрица  $B$  является единичной, следовательно,  $B Z_B = Z_B$ ,  $Z_B B^t = Z_B$ . Вектор извест-

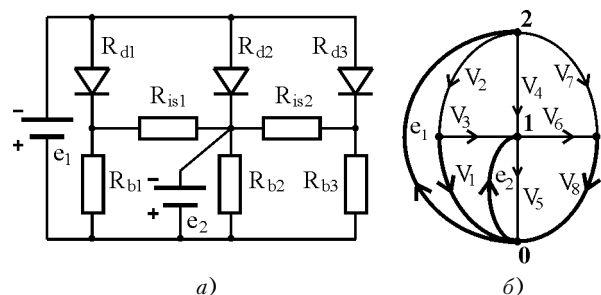


Рисунок 2 – Эквивалентная схема (а) и граф (б) для измерения межстрипового сопротивления без отсоединения сопротивления смещения:

$R_b$  – сопротивление смещения;  $R_d \gg R_b$

мальное количество линейно независимых уравнений для определения напряжения на элементах схемы равно 5, а матрица главных контуров  $B_D$  содержит 5 строк.

Матрица	Контур	Ветви						
		$e_1$	$e_2$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$
$B_D$	1	-1	0	1	0	0	0	0
	2	-1	-1	0	1	0	0	0
	3	-1	0	0	0	1	0	0
	4	0	-1	0	0	0	1	0
	5	0	-1	0	0	0	0	1

Для оценки межстриповых сопротивлений смещения без нарушения схемы собранного модуля стрип-детектора была предложена схема с использованием дополнительного источника напряжения  $e_2$ . Этот источник совместно с сопротивлением смещения  $R_{b2}$  образует дополнительный главный контур (рис. 2).

Направленный граф схемы дает возможность записать для нее матрицу главных контуров, состоящую из 6 строк, и, следовательно, получить систему из 6 линейно независимых уравнений для определения неизвестных переменных.

ных источников равен  $E_B = (e_1, e_2)^t$ . Обозначим правую часть уравнения  $U$ . Тогда система уравнений будет иметь вид

$$Z_B I_X = U. \quad (6)$$

Так как матрица  $Z_B$  – диагональная, то система (6) для измерения межстрипового сопротивления с «оторванным стрипом» примет вид

$$E_B = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \end{pmatrix}, \text{ матрицы } B_E = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -1 & -1 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & -1 \end{pmatrix},$$

$$Z = \begin{pmatrix} R_{d1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{d2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{d3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{is1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{is2} \end{pmatrix}.$$

Рассмотрим правую часть системы уравнений (4)

$$B_E E_B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_1 + e_2 \\ e_1 \\ e_2 \\ e_2 \end{pmatrix}.$$

Введем обозначение  $-B_E E_B = U$ . Тогда система уравнений (6) будет иметь вид  $Z_B(k, k) I_X(k) = U(k)$ ,  $k = 1 \dots 5$ , т. е. она распадется на 5 независимых линейных уравнений, решение которых относительно неизвестных параметров не представляет сложности. Действительно, так как матрица  $Z_B$  – диагональная, то имеем

$$\begin{cases} R_{d1} I_{x1} = e_1, \\ R_{d2} I_{x2} = e_1 + e_2, \\ R_{d3} I_{x3} = e_1, \\ R_{is1} I_{x4} = e_2, \\ R_{is2} I_{x5} = e_2, \end{cases}$$

т. е. система (6) распадается на 5 независимых линейных уравнений и ее решение относительно неизвестных параметров имеет вид

$$I_x = \begin{pmatrix} I_{x1} \\ I_{x2} \\ I_{x3} \\ I_{x4} \\ I_{x5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_1/R_{d1} \\ (e_1 + e_2)/R_{d2} \\ e_1/R_{d3} \\ e_2/R_{is1} \\ e_2/R_{is2} \end{pmatrix}.$$

Тогда

$$I_E = B_E^t I_x = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{x1} \\ I_{x2} \\ I_{x3} \\ I_{x4} \\ I_{x5} \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} -(I_{x1} + I_{x2} + I_{x3}) \\ -(I_{x2} + I_{x4} + I_{x5}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_E(1) \\ I_E(2) \end{pmatrix},$$

где

$$I_E(1) = -\left(\frac{e_1}{R_{d1}} + \frac{e_1 + e_2}{R_{d2}} + \frac{e_1}{R_{d3}}\right);$$

$$I_E(2) = -\left(\frac{e_1 + e_2}{R_{d2}} + \frac{e_2}{R_{is1}} + \frac{e_2}{R_{is2}}\right).$$

При

$$R_{d1} = R_{d2} = R_{d3} = R_d, \quad I_E(1) = -\frac{2(e_1 + e_2)}{R_d}. \quad (7)$$

При

$$R_{is1} = R_{is2} = R_{is}, \quad R_{d2} \gg R_{is}, \quad I_E(2) = -\frac{2e_2}{R_{is}}. \quad (8)$$

Следовательно, в наиболее простом случае, когда можно предположить, что межстриповые сопротивления равны между собой, т. е.  $R_{is1} = R_{is2}$ , ток через источник  $e_2$  связан с величиной сопротивлений простым соотношением (7), которое применялось для оценки межстриповых сопротивлений на ранней стадии исследования детекторов.

Решение системы уравнений (6) аналогичным способом для эквивалентной схемы на рис. 3 позволяет установить особенности измерения межстриповых сопротивлений в собранном модуле детектора.

Так, из рис. 3 видно, что, получив зависимость тока в цепи дополнительного источника смещения от его напряжения, можно определить значение межстрипового сопротивления. Из двух теоретических прямых, показанных на этом рисунке, следует, что при межстриповом сопротивлении  $R_{is} = 50$  МОм и напряжении дополнительного источника 1 В изменение  $R_{is}$  на 1 МОм приводит к измерению тока в цепи источника на 0,5 нА. Это говорит о том, что чувствительность метода при указанных параметрах равна 0,5 нА/МОм.

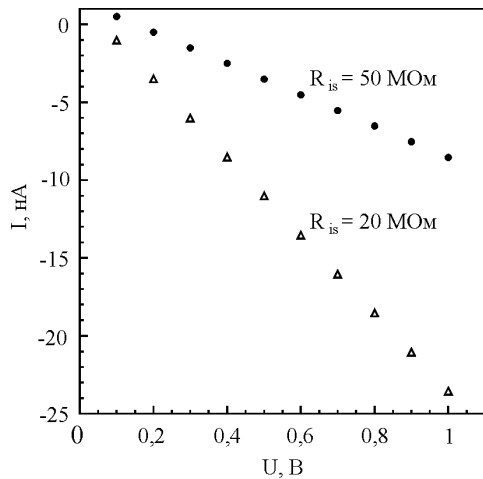


Рисунок 3 – Зависимость ток – напряжение для дополнительного источника смещения:  $R_{is}$  – межстриповое сопротивление

Хотя в некоторых частных случаях, аналогичных рассмотренному выше, решение системы (6) не представляет сложности, в общем случае необходимо применять специальные методы. Для решения системы линейных уравнений существует несколько общих методов, из которых наиболее часто используются метод исключения Гаусса, метод Зейделя. Конкретный алгоритм решения системы (6) зависит от набора параметров, характеризующих исследуемую схему, и размерности матрицы, описывающей граф схемы.

### ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА СТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТЕКТОРА

На рис. 4 приведена тестовая схема и ее граф для расчета по методу контурных токов [10].

Параметры схемы:  $R_1 = 6 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 2 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 1 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 5 \text{ Ом}$ ,  $R_5 = 4 \text{ Ом}$ ,  $R_6 = 3 \text{ Ом}$ ,  $e = 10 \text{ В}$ . Число узлов  $m + 1 = 5$ , число ветвей  $n = 7$ , число неза-

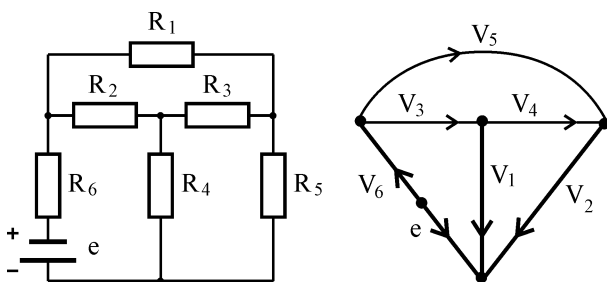


Рисунок 4 – Эквивалентная схема (а) и граф (б) для тестирования программы для расчета статических параметров детектора

висимых контуров  $n - m = 3$ . Матрица главных контуров имеет вид:

Матрица	Контур	Ветви						
		$e$	$V_1$	$V_2$	$V_6$	$V_3$	$V_4$	$V_5$
$B_D$	1	-1	1	0	1	1	0	0
	2	0	-1	1	0	0	1	0
	3	-1	0	1	1	0	0	1

Решая систему уравнений (6), получаем вектор токов  $I_B =$

$$I_B = \begin{pmatrix} 0,694215 \\ 0,776859 \\ 1,471074 \\ 1,057851 \\ 0,363636 \\ 0,413223 \end{pmatrix}, \text{ совпадающий с приведенным в [10].}$$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании теории направленных графов рассмотрены математические модели стрип-детектора для измерения межстриповых сопротивлений на постоянном токе. Приведены примеры расчета совместных линейных уравнений, выражающие закон Кирхгофа для электрической цепи, используемой для измерения межстриповых сопротивлений.

Приведенные в данной работе результаты исследований направлены на создание математических моделей и методов, сокращающих трудоемкость диагностического обеспечения современных полосковых детекторов на этапе тестирования их модулей. В работе показано, что для этих целей с успехом может применяться теория направленных графов, позволяющая создать топологические уравнения сложных электрических цепей.

### ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Прохорец С. И., Хажмурадов М. А., Лукьянова В. П. Анализ емкостных параметров стрип-детекторов // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – 2004. – № 2. – С. 41–43.
2. Schwarz A. S. Heavy flavour physics at colliders with silicon strip vertex detectors // Physics reports Review (Section of Physics Letters). – 1994. – Vol. 238, No. 182. – P. 1–133.
3. Angarano M. M., Bader A., Greanza D. et al. Characterization and simulation of a single-sided, n+ on a n silicon microstrip detector before and after neutron irradiation // Nucl. Instr. and Meth. – 1999. – A 428. – P. 336–347.
4. Frautchi M. A., Hoferkamp H. R., Seidel S. C. Capacitance Measurements of Double-Sided Silicon Microstrip Detectors. CDF/DOC VTX/ CDF/2546. – The New Mexico Center for Particle Physics, Albuquerque, 1995. – 62 p.
5. Prokesch M., Szeles C. Accurate measurement of electrical bulk resistivity and surface leakage of CdZnTe radiation detector crystals // Journal of Applied Physics. – 2006. – No. 100. – P. 14503.

6. Атабеков Г. И. Основы теории цепей. – М.: Энергия, 1969. – 424 с.
7. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем. – М.: Радио и связь, 1988. – 560 с.
8. Чуа Л. О., Лин Пен-Мин. Машинный анализ электронных схем. – М.: Энергия, 1980. – 640 с.
9. Алексеев О. В., Головкин А. А., Пивоваров И. Ю., Чавка Г. Г. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств. – М.: Высш. шк., 2000. – 480 с.
10. Геворкян Г. Х., Семенов В. Н. Электротехнические расчеты на языке Бейсик. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 184 с.

Надійшла 09.01.2008

*На підставі теорії направлених графів розглянуто математичні моделі стрип-детектора для вимірювання міжстрипових опорів на постійному струмі. Наведено приклади розрахунку сумісних лінійних рівнянь для електричних ланцюгів, які використовуються для вимірювання міжстрипових опорів.*

*On the basis of graph theory mathematical models of strip detector for measurements of interstrip resistor were submitted. The examples of linear equation calculations for interstrip resistor measurements were reduced.*

УДК 621.372.81

С. С. Самойлик, В. П. Бондарев

## ДОБРОТНОСТЬ ПРЯМОУГОЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА С ПЕРЕМЕННЫМ ЧИСЛОМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

*Расчет параметров прямоугольного резонатора со сложной формой диэлектрического заполнения решается методом интегральных уравнений макроскопической электродинамики. Проведенный численный анализ позволил вычислить добротности прямоугольного резонатора, для различных  $H_{\text{мод}}$  типов колебаний в зависимости от параметров сложного диэлектрического заполнения.*

### ВВЕДЕНИЕ

Неотъемлемым элементом почти любой СВЧ экспериментальной установки является резонатор. Именно прогресс в их совершенствовании часто приводил к достижению качественно новых результатов. Так, появление мазеров было бы невозможно без применения высокодобротных СВЧ резонаторов. Высокодобротные резонаторы активно используются для сужения и стабилизации линии генерации, в качестве фильтров и дискриминаторов, в прецизионных физических экспериментах.

Потери электромагнитной энергии в резонаторе складываются из потерь в среде, заполняющей резонатор, и потерь в металлической оболочке резонатора. Кроме того, часть энергии из резонатора передается через элементы связи в устройства, связанные с резонатором.

Общие потери энергии в резонаторе:

$$W_{\text{п}} = W_{\text{мет}} + W_{\text{д}} + W_{\Sigma} + W_{\text{изл}}, \quad (1)$$

где  $W_{\text{мет}}$  – энергия потерь за период колебания в оболочке резонатора;  $W_{\text{д}}$  – энергия потерь в среде, запол-

няющей резонатор;  $W_{\Sigma}$  – энергия, отдаваемая резонатором во внешние устройства;  $W_{\text{изл}}$  – энергия, теряемая на излучение.

Энергию потерь можно выразить как произведение мощности потерь, под которой подразумевается суммарная мощность потерь в металле, диэлектрике, а также мощность, отдаваемую резонатором во внешние устройства, и энергию, теряемую на излучение, на время, т. е. период колебания, соответствующий резонансу. Период колебаний связан с частотой колебаний  $f_{\text{р}}$  обратным соотношением, в силу чего  $W_{\text{п}} = P_{\Sigma} / f_{\text{р}}$ . При этом:

$$Q = 2\pi f_{\text{р}} \frac{W}{P_{\Sigma}}, \quad (2)$$

где  $W$  – энергия, запасенная в колебательной системе.

С учетом (1) и (2), полную добротность (нагруженную)  $Q$  можно рассматривать как суперпозицию «частичных» добротностей:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{\text{мет}}} + \frac{1}{Q_{\text{д}}} + \frac{1}{Q_{\Sigma}} + \frac{1}{Q_{\text{рад}}}, \quad (3)$$

где  $Q_{\text{мет}} = 2\pi f_{\text{р}} \frac{W}{P_{\text{мет}}}$  – добротность, обусловленная по-

терями в стенках резонатора;  $Q_{\text{д}} = 2\pi f_{\text{р}} \frac{W}{P_{\text{д}}}$  – добротность, обусловленная диэлектрическим заполнением