

УДК 621.382.3

**ПАССИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ  
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ (СВЧ ИС) НА АЛМАЗЕ.  
МИКРОПОЛОСКОВЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ**

**А.Э.НАБИЕВ\***, **М.С.АФАНАСЬЕВ\*\***, **К.Н.ЗЯБЛЮК\*\***, **Г.В.ЧУЧЕВА\*\***  
*\*Азербайджанский Государственный Педагогический Университет*  
*\*\*Фрязинский филиал Института Радиотехники и Электроники*  
*им.В.А.Котельникова Российской Академии Наук*  
*gvc@ms.ire.mssi.ru*

*Методом численного решения уравнений Максвелла исследованы частотные зависимости характеристического сопротивления микрополосковых конденсаторов (МПК) на алмазе с различными геометрическими параметрами. Установлено, что для получения различных емкостей МПК, следует использовать различные полосковый проводники.*

**Ключевые слова:** микрополосковый конденсатор, полосковый проводник, гребенчатая структура.

Микрополосковый конденсатор (МПК) представляет собой алмазную подложку, нижняя грань которой полностью покрыта проводящим слоем, а на верхней напылен полосковый проводник (рис.1). Нижняя грань заземлена. Форма и размеры верхнего проводника выбираются таким образом, чтобы его характеристическое сопротивление было обратно пропорционально частоте распространяющейся волны.

Задача данного расчета – определить геометрические параметры МПК, для которых выполняются следующие требования:- диапазон рабочих частот от 3 до 15 ГГц;- ёмкость МПК должна быть в пределах от 0,01 до 2 пФ;

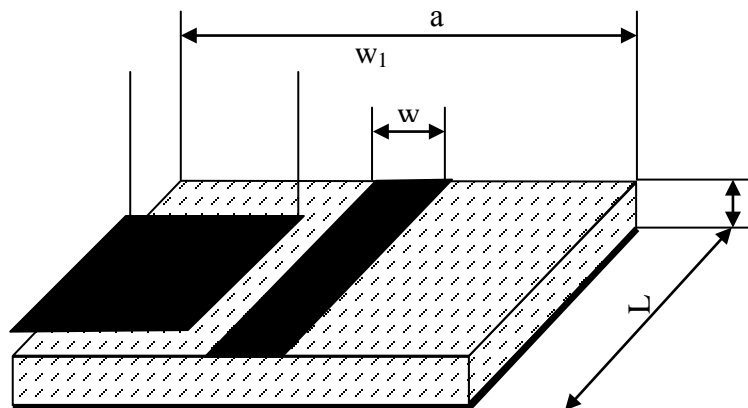


Рис 1. Микрополосковый конденсатор на основе алмаза.

Расчет параметров МПК проводился при помощи численного моделирования с использованием программы конечно-элементного анализа [1–5]. Программа позволяет рассчитать основные характеристики СВЧ устройств путем решения уравнений Максвелла с заданными параметрами среды и граничными условиями. В процессе решения пространство разбивается на тетраэдры, внутри каждого из которых рассчитываются напряженности электрического и магнитного полей. Размеры тетраэдров определяются автоматически, исходя из заданных критериев сходимости решения.

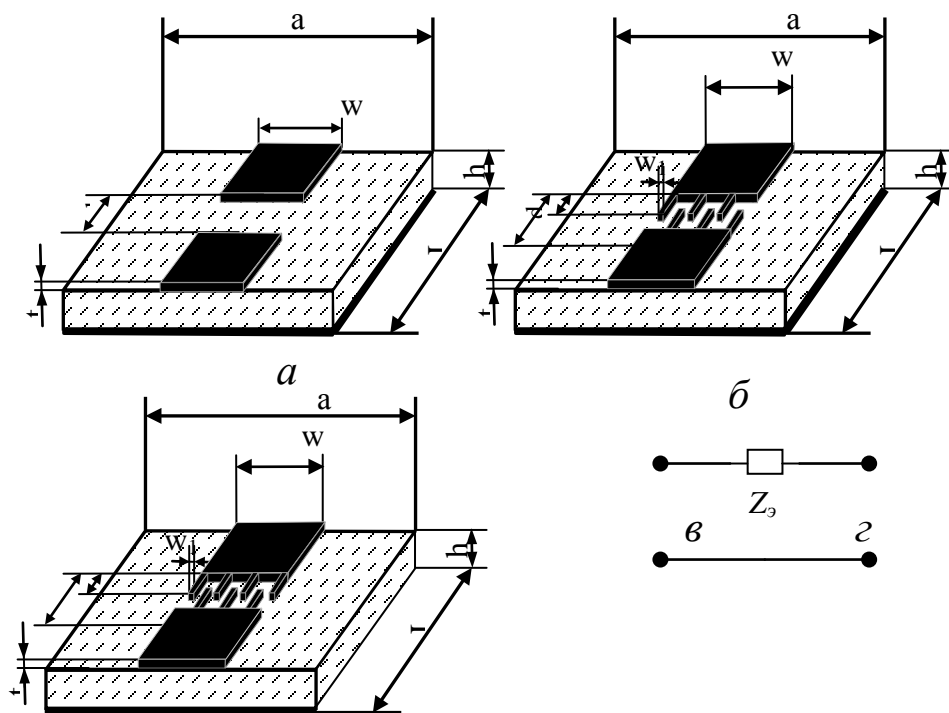
В результате расчета определяются конфигурация электрического и магнитного полей, S-, Z-, Y-матрицы СВЧ-устройства, постоянные распространения волн.

Геометрические параметры МПК выбирались исходя из требований к технологичности конструкции. Были выбраны следующие размеры алмазной подложки: ширина  $a=3.5$  мм, длина  $L = 3.5$  мм, толщина  $h = 0.3$  мм. Толщина полоскового проводника была выбрана равной 3 мкм, ширина в торцах – 0.48 мм, что необходимо для согласования с линией передачи, имеющей характеристическое сопротивление 50 Ом (см. Микрополосковые линии передачи). Остальные размеры полоскового проводника и его форма подлежали определению по результатам расчета. Материал полоскового проводника – медь.

Граничные условия были заданы следующим образом: к торцам МПК подсоединены два выхода одинаковых полубесконечных прямоугольных волноводов, в которых распространяется основная мода, нижняя грань подложки заземлена. На большом расстоянии от МПК граничные условия определялись только наличием излучения.

В зависимости от того, последовательно или параллельно должен

быть подсоединен конденсатор в эквивалентной схеме линии передачи, выбирались различные конфигурации верхнего проводника. Так, для последовательного включения конденсатора были исследованы схемы, представленные на рис.2 а–в (схемы с единичным зазором – Конденсатор 1 – и с симметричной и асимметричной гребенчатой структурой – Конденсатор 2).



**Рис.2.** Схемы микрополосковых конденсаторов (а–в) и эквивалентный четырехполюсник (г).

В результате расчета в программе конечно-элементного анализа определяются характеристические сопротивления линий передачи  $Z_0$  и элементы матрицы рассеяния конденсатора  $\{S_{ij}\}$ . Эффективный импеданс МПК  $Z_{эфф}$  при последовательном подключении рассчитывается по следующей формуле:

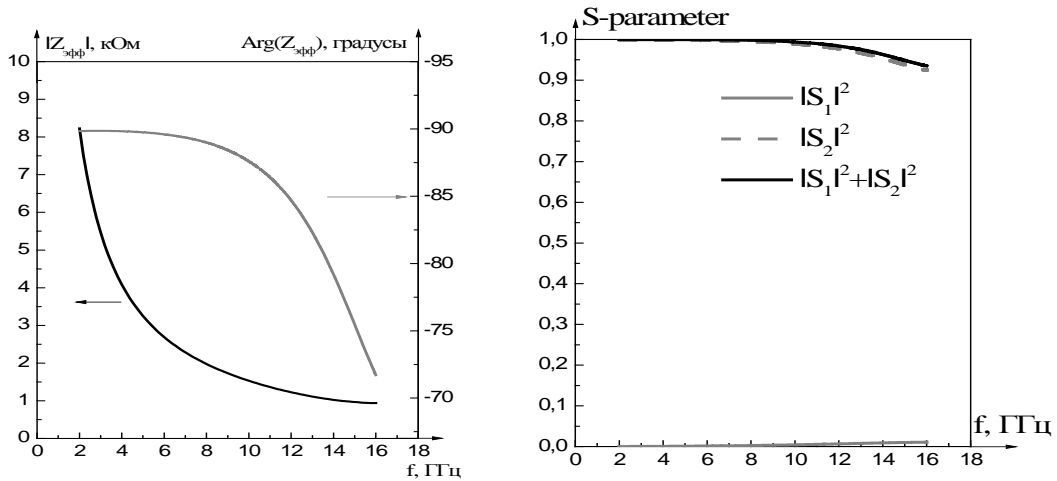
$$\frac{Z_{эфф}}{2Z_0} = \sqrt{\frac{S_{11} \cdot S_{22}}{S_{12} \cdot S_{21}}} \quad (1)$$

Значение аргумента  $Z_{эфф}$  при извлечении корня выбирается в пределах от  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$ . Величина эффективной емкости  $C_{эфф}$  определяется

по формуле:

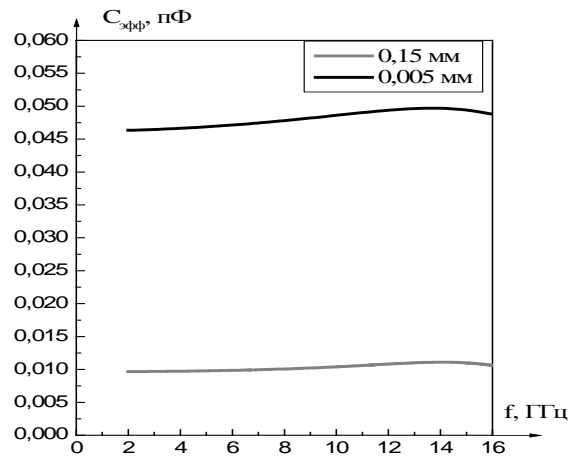
$$C_{эфф} = \frac{-1}{2\pi \cdot f \cdot \text{Im}(Z_{эфф})} \quad (2)$$

Данная формула применима, если в рабочем интервале частот произведение  $f \cdot \text{Im}(Z_{эфф})$  остается постоянным.



(а)

(б)



(в)

**Рис. 3**(а)- частотная зависимость эффективного импеданса Конденсатора 1 ( $d=0,17$  мм), (б)-коэффициенты прохождения  $|S_{12}|^2$ , отражения  $|S_{11}|^2$  и их сумма для Конденсатора 1 зависимости от частоты, (в)- зависимость эффективной емкости Конденсатора 1 от частоты для двух значений зазоров между проводниками.

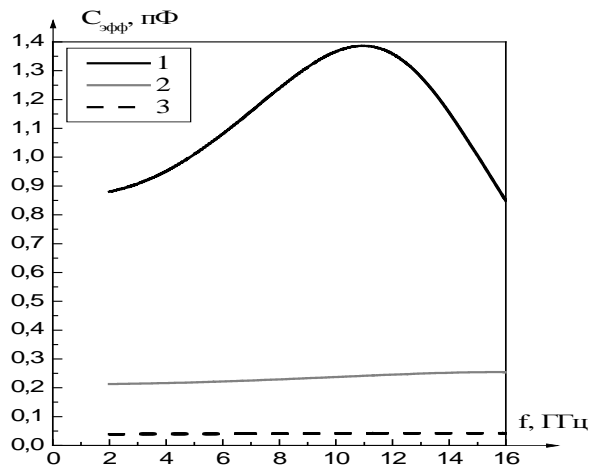
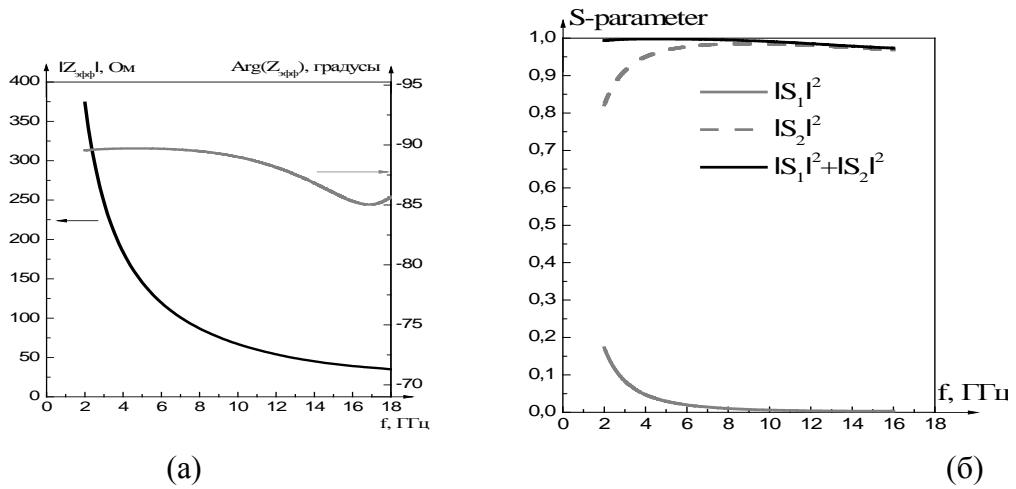
Для Конденсатора 1 (рис.2 а) на рис.3 (а) представлены зависимости величин модуля и аргумента эффективного импеданса  $Z_{\text{эфф}}$  от частоты  $f$  для зазора, равного 0,17 мм. Видно, что зависимость  $Z_{\text{эфф}}(f)$  имеет гиперболический характер, аргумент эффективного импеданса во всем интервале частот близок к  $(-90^\circ)$ . На рис.3(б) показана зависимость коэффициентов отражения и прохождения и их суммы от частоты. Отличие суммы коэффициентов от 1 равно доле мощности, потерянной на нагрев проводников и излучение. В диапазоне частот от 3 до 15 ГГц потери не превышают 6%.

На рис.3(в) показаны частотные зависимости емкости Конденсатора 1 с зазорами 0,17 мм и 0,005 мм. При зазоре 0,17 мм емкость составляет 0,01 пФ. Уменьшение зазора приводит к увеличению емкости. Максимальное значение емкости получено при зазоре 0,005 мм и составляет 0,048 пФ. Дальнейшее уменьшение зазора нежелательно из-за возможного электрического пробоя конденсатора.

Для получения больших значений эффективной емкости были исследованы микрополосковые конденсаторы с гребенчатой структурой (Конденсатор 2, рис.2 б, в).

На рис.4(а) представлена частотная зависимость модуля и аргумента эффективного импеданса Конденсатора 2 (ширина проводника 0,48 мм, общее количество выступов 6, зазор  $d=0,7$  мм, ширина выступа  $w_1=0,07$  мм, длина выступа  $d_1=0,69$  мм). Зависимость модуля эффективного импеданса от частоты имеет гиперболический характер, при этом аргумент близок к  $(-90^\circ)$  и слабо меняется с частотой. Зависимость коэффициентов отражения и пропускания и их суммы от частоты представлена на рис.4(б). Видно, что потери мощности в данной структуре не превышают 5%.

На рис.4(а) представлена зависимость эффективной емкости Конденсатора 2 с шестью выступами от частоты, для различных величин зазора  $d$ , ширины выступа  $w_1$  и длины выступа  $d_2$  (параметры структур приведены в таблице 1). Зависимость эффективной емкости от размеров выступов является достаточно сложной. Увеличение длины выступов и уменьшение промежутков между выступами приводит к увеличению эффективной емкости конденсатора. Выбор ширины и длины выступа в гребенчатой структуре с 6 выступами позволяет получить конденсаторы с различными значениями эффективной емкости.



**Рис.4**(а)- зависимость эффективного импеданса Конденсатора 2 с 6 выступами от частоты, (б)-коэффициенты прохождения  $|S_{12}|^2$ , отражения  $|S_{11}|^2$  и их сумма для Конденсатора 2 в зависимости от частоты, (в)-зависимость эффективной емкости Конденсатора 2 с 6 выступами от частоты (параметры структур приведены в таблице 1).

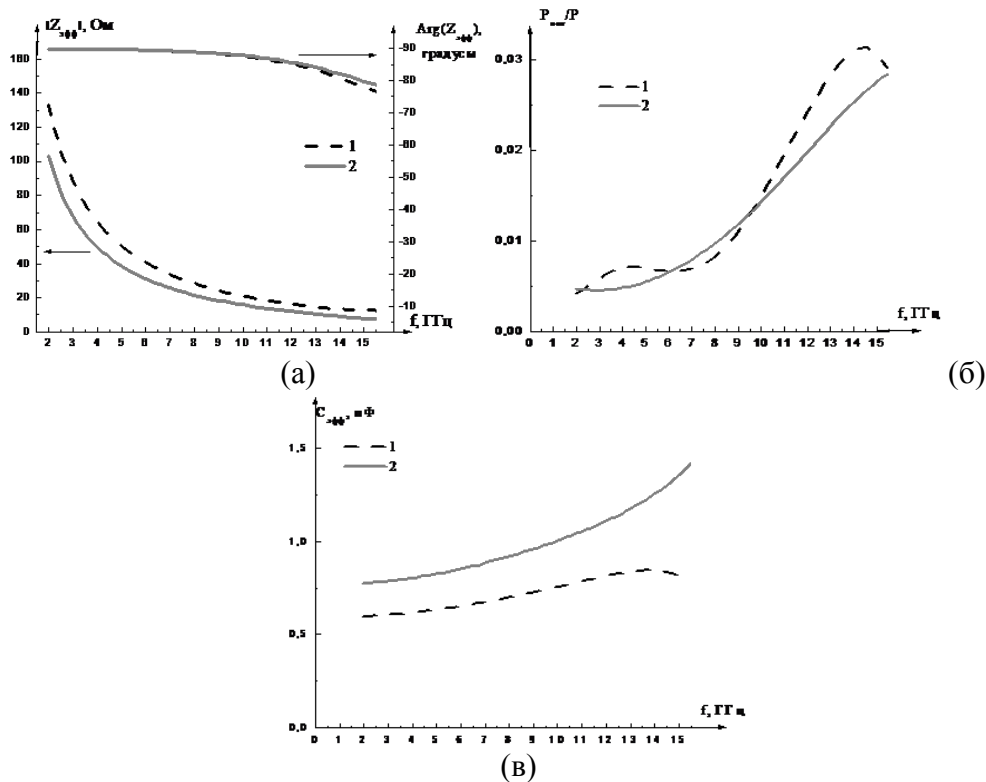
Таблица 1

**Параметры Конденсатора 2 (структура с 6 выступами)**

№ п/п	Зазор d, мм	Ширина выступа w <sub>1</sub> , мм	Длина выступа d <sub>1</sub> , мм	Эффективная емкость C <sub>эфф</sub> , пФ		
				f=3 ГГц	f=10 ГГц	f=15 ГГц
1	0,2	0,050	0,164	0,0231	0,0236	0,0232
2	0,7	0,070	0,688	0,0355	0,0365	0,0363
3	2,0	0,074	1,99	0,91	1,37	1,01

Максимальное значение емкости, полученное при моделировании конденсатора с гребенчатой структурой с 6 выступами, составляет 1,2 пФ для величины зазора 2,0 мм. Тем не менее, необходимо отметить, что при определенных комбинациях величины зазора (для  $d > 1$  мм) и ширины выступа наблюдаются резонансные явления, вследствие чего зависимость модуля и аргумента эффективного импеданса структур от частоты становится достаточно сложной, и структуру нельзя рассматривать как конденсатор.

Изменение емкости возможно также за счет изменения количества выступов в структуре. На рис. 5(а) показаны зависимости модуля и аргумента эффективного импеданса микрополосковых конденсаторов с гребенчатой структурой от частоты для структур с различным количеством выступов. Зависимости  $|Z_{эфф}|$  имеют гиперболический характер, тогда как аргумент близок к  $(-90^\circ)$  для всех моделируемых структур. Частотные зависимости мощности потерь в микрополосковых конденсатора представлены на рис. 5(б). Для всех моделируемых структур потери не превышают 4% в диапазоне частот от 3 до 15 ГГц.



**Рис.5**(а)-частотные зависимости эффективного импеданса Конденсатора 2 с 8 выступами (кривая 1,  $w_1=0,054$  мм,  $d=1,15$  мм) и 10 выступами (кривая 2,  $w_1=0,043$  мм,  $d=1,1$  мм), (б)- частотные зависимости потерь мощности в Конденсаторе 2 с 8 выступами (кривая 1,  $w_1=0,054$  мм,  $d=1,15$  мм) и 10 выступами (кривая 2,  $w_1=0,043$  мм,  $d=1,1$  мм), (в)- частотные зависимости эффективной емкости Конденсатора 2 с 8 выступами (кривая 1,  $w_1=0,054$  мм,  $d=1,15$  мм) и 10 выступами (кривая 2,  $w_1=0,043$  мм,  $d=1,1$  мм).

Зависимости эффективных емкостей от частоты приведены на рис.5 (в). Значения эффективных емкостей при разных частотах, а также параметры соответствующих конденсаторов с гребенчатой структурой приведены в таблице 2 .

Таблица 2

**Параметры конденсаторов с гребенчатой структурой**

Количество выступов	Зазор d, мм	Ширина выступа w <sub>1</sub> , мм	Длина выступа d <sub>1</sub> , мм	Максимальная эффективная емкость C <sub>эфф</sub> , пФ		
				f=3ГГц	f=10ГГц	f=15ГГц
6	2	0,074	1,99	0,91	1,37	1,01
7	1,37	0,064	1,365	0,73	0,97	1,3
8	1,15	0,054	1,144	0,61	0,76	0,82
9	1,27	0,048	1,265	0,8	1,1	1,5
10	1,1	0,043	1,095	0,8	1,0	1,4
11	1,12	0,038	1,114	1,2	1,8	3,3

**Выводы**

1.Методом численного решения уравнений Максвелла исследованы частотные зависимости характеристического сопротивления микрополосковых конденсаторов (МПК) на алмазе с различными геометрическими параметрами.

2.Для получения емкостей МПК, равных 0,01–0,05 пФ следует использовать полосковый проводник с зазором (Конденсатор 1). Величину зазора следует выбирать в пределах от 0,01 мм до 0,18 мм.

3.Для получения емкостей МПК от 0.04 пФ до 1,2 пФ, целесообразно использовать полосковый проводник в виде гребенчатой структуры (Конденсатор 2) с количеством выступов не менее 6. Изменение емкости в пределах от 0,02 пФ до 1,2 пФ достигается изменением количества выступов, их ширины и длины. Максимальное значение емкости, равное 1,2 пФ, достигается при следующих параметрах гребенчатой структуры:

- количество выступов 6;
- длина выступа, мм 1,99;
- ширина выступа, мм 0,074;
- зазор между проводниками, мм 2.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Денисов Д.С., Кондратьев Б.В., Лесик Н.И. и др.; Под ред. В.М. Седых/ Полосковые линии и устройства сверхвысоких частот. Харьков: Вища школа, 1974, 276 с.
2. Лебедев И.В. Под ред. Н.Д. Девяткова/ Техника и приборы СВЧ. М.: Высшая школа, 1970, 439.
3. Веселов Г.И., Егоров Е.Н., Алехин Ю.Н. и др.. Под ред. Г.И. Веселова/ Микроэлектронные устройства СВЧ: Учебное пособие для радиотехнических специальностей

- вузов. М.: Высш. шк., 1988, 280 с., ил.
4. Спектор Н. Оценка допустимой мощности в полосковой линии. - В кн.: Полосковые системы сверхвысоких частот. Пер. с англ. / Под ред. В.И. Сушкевича. М.: ИЛ, 1959, с.160 - 172.
  5. Shiffres P. How much CW power can striplinehandle. *Microwaves*, 1966, No 6, p. 25 - 34.
  6. Афанасьев М.С., Бугаев А.С., Захарченко К.В., Зяблюк К.Н., Митягин А.Ю., Талипов Н.Х., Чучева Г.В., Набиев А.Э. Пассивные элементы сверхвысокочастотных интегральных схем (СВЧ ИС) на алмазе. Часть 1. Микрополосковые линии передачи на алмазе // Успехи современной радиоэлектроники. Зарубежная радиоэлектроника, 2013, №6, с. 53-60.

### **ALMAZ ÜZƏRİNDƏ İFRATYÜKSƏK TEZLİKLİ İNTEQRAL SXEMİNİN (İYT İS) PASSİV ELEMENTLƏRİ. MİKROZOLAQŞƏKİLLİ KONDENSATORLAR**

**A.Ə.NƏBİYEV, M.S.AFANASIYEV, K.N.ZYABLÜK, Q.V.ÇUÇEVA**

#### **XÜLASƏ**

Maksvell tənliklərinin həllinin qiymətləndirmə metodu ilə müxtəlif həndəsi parametrlərlə almaz üzərindəki mikrozoalaqlı kondensatorların (MZK) xarakteristik müqavimətinin tezlik asılılığı tədqiq edilmişdir. Müəyyən olunmuşdur ki, müxtəlif tutumlu MZK-nın alınması üçün müxtəlif zolaqlı naqillərdən istifadə etmək lazımdır.

**Açar sözlər:** mikrozoalaqlı kondensator, zolaqlı naqıl, daraqşəkilli quruluş.

### **PASSIVE MICROWAVE INTEGRATED CIRCUITS ON THE DIAMOND. MICROSTRIP CAPACITORS**

**A.A.NABIYEV, M.S.AFANASIYEV, K.N.ZYABLUK, G.V.CHUCHEVA**

#### **SUMMARY**

The frequency dependence of the characteristic impedance of the microstrip capacitors (IMC) on the diamond with different geometrical parameters is investigated by numerical solutions of Maxwell's equations. It is found that for different capacities of the IPC, you should use a variety of plain conductors.

**Key words:** microstrip capacitor, a strip conductor, comb structure.

*Поступила в редакцию: 26.12.2014 г.*

*Подписано к печати: 13.02.2015 г.*