

МИКРОВОЛНОВЫЙ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЙ ФИЛЬТР НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЯХ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ СЕТКАМИ

© *Б.А. Беляев*^{1,2}, *В.В. Тюрнев*^{1,2}, *А.С. Волошин*^{2,3}, *Галеев Р.Г.*^{3,4}

¹ Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

³ Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика

М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

⁴ АО «НПП «Радиосвязь», Красноярск, Россия

E-mail: belyaev@iph.krasn.ru

Разработана конструкция полосно-пропускающего фильтра, состоящего из диэлектрических слоев с металлическими сетками на поверхностях. Диэлектрические слои являются полуволновыми резонаторами, а сетки служат зеркалами с заданными отражательными свойствами, обеспечивающими оптимальные связи крайних резонаторов со свободным пространством и оптимальные связи между резонаторами. Изготовленный опытный образец синтезированного фильтра третьего порядка с центральной частотой полосы пропускания ~ 12 GHz и относительной ее шириной $\sim 17\%$ показал хорошее согласие теории и эксперимента. На основе предложенной конструкции можно изготавливать радиопрозрачные в заданной полосе частот многослойные панели для укрытия микроволновых антенн.

В настоящее время исследователи активно изучают особенности распространения электромагнитных волн, падающих на слоистые конструкции из диэлектрических пластин, на границах раздела которых сформированы периодические структуры из полосковых проводников (2D решетки или сетки). Интерес к таким конструкциям обусловлен возможностью создания на их основе частотно-селективных поверхностей, служащих полосно-пропускающими фильтрами в диапазонах от субмикронных до дециметровых длин волн [1-4]. Полосковые элементарные ячейки, из которых состоит периодическая 2D структура, например, металлические квадраты или ячейки металлической сетки, являются резонаторами, которые проявляют свойства параллельных или последовательных колебательных контуров [5]. Именно поэтому, используя многослойные конструкции из таких структур, можно создавать различные полосно-пропускающие фильтры [5, 6]. Важно отметить, что длина волны на центральной частоте полосы пропускания в таких фильтрах, которые нередко называют частотно-селективными поверхностями [7], не только много больше периода решеток, но и много больше толщины диэлектрических слоев.

Известно, что сопротивление проводников на высоких частотах растет из-за уменьшения толщины скин-слоя, что приводит, с учетом шероховатости подложки, к снижению собственной добротности полосковых резонаторов. Поэтому главным недостатком многослойных фильтров, использующих резонансные структуры из полосковых проводников, являются сравнительно большие потери мощности в полосе пропускания устройств. Более перспективными исследователи считают конструкции фильтров, в которых сами диэлектрические слои являются высокодобротными резонаторами, а 1D или 2D структуры из полосковых проводников на их поверхностях служат зеркалами с заданной отражательной способностью [8, 9]. При этом период полосковых структур выбирается значительно меньше длины волны, чтобы их резонансные частоты находились значительно выше полосы пропускания фильтра и не сужали высокочастотную полосу заграждения. В работах [8, 10] для предложенных конструкций получены формулы синтеза фильтров с заданной шириной полосы пропускания и заданным уровнем потерь на отражение в ней, которые позволяют определить оптимальные размеры полосковых проводников на поверхностях каждого из диэлектрических слоев.

В данной работе исследована разработанная конструкция полосно-пропускающего фильтра третьего порядка на диэлектрических слоях-резонаторах, разделенных металлическими сетками. Приведено сравнение расчетных и измеренных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) опытного образца фильтра.

Конструкция исследуемого фильтра содержит две одинаковые параллельные диэлектрические пластины с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_1 и толщиной h_1 , разделенных диэлектрическим слоем, например воздухом, толщиной h_2 с диэлектрической проницаемостью ϵ_2 (рис. 1). На всех поверхностях диэлектрических пластин квадратные сетки из металлических проводников имеют одинаковый период T . При этом ширина полосковых проводников у наружных сеток равна w_1 , а у внутренних – w_2 . Очевидно, что в рассматриваемой конструкции каждая из диэлектрических пластин и воздушный зазор между ними являются взаимодействующими полуволновыми резонаторами, которые формируют полосу пропускания устройства.

При настройке фильтра необходимо учитывать, что центральная частота его полосы пропускания определяется толщиной диэлектрических слоев, а ширина полосы пропускания и заданный максимальный уровень отражений в ней подбором ширины полосковых проводников у внутренних и наружных сеток, соответственно, w_2 и w_1 . С увеличением w_2 и w_1 связь между соседними резонаторами и крайних резонаторов со свободным пространством уменьшается, что приводит к уменьшению ширины полосы пропускания фильтра и наоборот. Важно отметить, что металлические сетки дополнительно понижают резонансные частоты резонаторов, причем тем сильнее, чем больше связь между ними.

Наиболее просто расчет АЧХ рассматриваемого фильтра при нормальном падении электромагнитной волны может быть выполнен в квазистатическом приближении матричным методом. Для всего фильтра $ABCD$ -матрица (классическая матрица передачи) может быть рассчитана как произведение $ABCD$ -матриц каждого компонента конструкции [11], т.е. каждого слоя и каждой сетки. Для определенности будем предполагать, что временная зависимость компонент электромагнитного поля описывается множителем $\exp(-i\omega t)$. В этом случае нормированная $ABCD$ -матрица для каждого диэлектрического слоя может быть рассчитана по формуле [11]

$$\begin{pmatrix} A_{1,2}^d & B_{1,2}^d \\ C_{1,2}^d & D_{1,2}^d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{1,2} & -i \frac{\sin \theta_{1,2}}{n_{1,2}} \\ -i n_{1,2} \sin \theta_{1,2} & \cos \theta_{1,2} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $n_{1,2} = \sqrt{\varepsilon_{1,2}}$ – показатели преломления слоев, а $\theta_{1,2} = \frac{\omega}{c} n_{1,2} h_{1,2}$ – фазовые толщины диэлектрических слоев. Здесь верхний индекс d указывает на то, что $ABCD$ -матрица относится к слою диэлектрика.

Матрица рассеяния бесконечно тонкой идеально проводящей металлической сетки, расположенной на границе сред с показателями n_1 и n_2 , выражается формулами [12]

$$\begin{pmatrix} S_{11}^m & S_{12}^m \\ S_{21}^m & S_{22}^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{n_1 - n_2 - iZ_0 Y_{1,2}}{n_2 + n_1 + iZ_0 Y_{1,2}} & \frac{2\sqrt{n_2 n_1}}{n_2 + n_1 + iZ_0 Y_{1,2}} \\ \frac{2\sqrt{n_2 n_1}}{n_2 + n_1 + iZ_0 Y_{1,2}} & \frac{n_2 - n_1 - iZ_0 Y_{1,2}}{n_2 + n_1 + iZ_0 Y_{1,2}} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$Y_{1,2} = \frac{2\pi}{\omega \mu_0 (T - w_{1,2}) \cdot \ln \left(\operatorname{cosec} \left(\frac{\pi w_{1,2}}{2T} \right) \right)} - \omega \varepsilon_0 T \frac{n_1^2 + n_2^2}{\pi} \cdot \ln \left(\sec \left(\frac{\pi w_{1,2}}{2T} \right) \right), \quad (3)$$

полученными в квазистатическом приближении, где индекс m указывает на металл, а Z_0 , μ_0 и ε_0 – характеристическое сопротивление, абсолютная магнитная и абсолютная диэлектрическая проницаемости свободного пространства, соответственно. Отсюда элементы нормированной $ABCD$ -матрицы металлической сетки могут быть вычислены по формулам [11]

$$\begin{aligned} A^m &= (1 + S_{11}^m - S_{22}^m - \det[S_{ik}^m]) n_2 / (2S_{21}^m n_1), \\ B^m &= (1 + S_{11}^m + S_{22}^m + \det[S_{ik}^m]) / (2S_{21}^m n_1 n_2), \\ C^m &= (1 - S_{11}^m - S_{22}^m + \det[S_{ik}^m]) n_1 n_2 / (2S_{21}^m), \\ D^m &= (1 - S_{11}^m + S_{22}^m - \det[S_{ik}^m]) / (2S_{21}^m n_1 n_2). \end{aligned} \quad (4)$$

Перемножив $ABCD$ -матрицы каждого компонента рассматриваемой структуры, можно вычислить матричные элементы A , B , C и D матрицы передачи всей конструкции рассматриваемого фильтра.

Селективные свойства любого фильтра характеризуют частотной зависимостью матричных элементов его матрицы рассеяния \mathbf{S} . Коэффициентами отражения являются матричные элементы S_{11} и S_{22} , а коэффициентами прохождения – элементы S_{21} и S_{12} . Здесь первый индекс указывает номер порта, на котором наблюдается рассеянная волна, а второй индекс указывает номер порта, на который падает волна.

Рассматриваемая конструкция является симметричным и взаимным четырехполюсником [11]. Поэтому выполняются равенства $|S_{11}| = |S_{22}|$, $S_{21} = S_{12}$. Вычислив элементы $ABCD$ -матрицы фильтра, значения коэффициентов отражения и прохождения несложно получить по формулам [11]

$$S_{11} = \frac{A + B - C - D}{A + B + C + D}, \quad S_{21} = \frac{2}{A + B + C + D}. \quad (5)$$

Здесь предполагается, что фильтр окружает среда с показателем преломления $n = 1$.

На основе полученных формул была написана компьютерная программа численного анализа рассмотренной конструкции фильтра третьего порядка (см. рис. 1). С помощью этой программы был проведен параметрический синтез конструктивных параметров фильтра, в котором диэлектрические слои и сетки на их поверхностях изготовлены из металлизированных пластин ТММЗ корпорации Rogers, имеющих толщину $h_1 = 5.08$ mm, относительную диэлектрическую проницаемость $\epsilon_1 = 3.41$ и толщину металлизации из меди 17.5 μm . Заметим, что частота полуволнового резонанса ($\lambda_1/2 = h_1$) в таком диэлектрическом слое равна $f_1 \approx 15.96$ GHz. Однако из-за присутствия сеток в фильтре центральная частота его полосы пропускания f_0 , очевидно, будет ниже частоты f_1 .

Учитывая тот факт, что период сеток должен быть меньше $\lambda_1/2$ [12], в исследуемом фильтре зафиксируем $T = 3$ mm. В рассматриваемой конструкции внутренние металлические сетки, как уже отмечалось, определяют связь резонаторов друг с другом, обеспечивая требуемую ширину полосы пропускания, а наружные сетки – связь крайних резонаторов со свободным пространством, обеспечивая уровень отражений в полосе пропускания, не выше заданного. Для определенности, пусть, максимумы отражений в полосе пропускания не превышают -14 dB. Очевидно, оптимальным величинам соответствующих связей резонаторов друг с другом и со свободным пространством будут отвечать определенные значения w_1 и w_2 . Для простоты анализа исследуемой конструкции зафиксируем в ней ширину полосковых проводников наружных сеток $w_1 = 0.1$ mm.

Таким образом, учитывая все, перечисленные выше условия, при параметрическом синтезе фильтра потребуется подобрать лишь два параметра конструкции: ширину полосковых проводников внутренних сеток и толщину воздушного зазора между диэлектрическими пластинами. По результатам синтеза эти параметры принимают, соответственно, следующие зна-

чения $w_2 = 0.58 \text{ mm}$ и $h_2 = 11.15 \text{ mm}$. Амплитудно-частотная характеристика прямых потерь $S_{21}(f)$ синтезированного фильтра показана сплошной линией на рис. 2. Фильтр имеет центральную частоту полосы пропускания $f_0 = 12.44 \text{ ГГц}$ и относительную ширину полосы пропускания, измеренную по уровню -3 dB от уровня минимальных потерь, $\Delta f/f_0 = 16.7 \%$.

Формулы, по которым был проведен синтез фильтра, как уже отмечалось, были получены в квазистатическом приближении при идеальных проводниках в сетках слоистой конструкции [12], поэтому для проверки точности формул нами в электродинамическом пакете CST Microwave Studio были рассчитаны амплитудно-частотные характеристики $S_{21}(f)$ и $S_{11}(f)$ 3D модели фильтра, показанные штриховыми линиями на рис. 2. В модели использовались те же конструктивные параметры, что и в синтезированном по формулам фильтре, но в отличие от него, учитывались еще и омические потери в медных проводниках сеток. В результате минимальные потери в полосе пропускания фильтра увеличились от нуля до 0.32 dB , однако частотные зависимости прямых потерь $S_{21}(f)$ и потерь на отражение $S_{11}(f)$ при этом почти не изменилась. Центральная частота полосы пропускания фильтра $f_0 = 12.41 \text{ ГГц}$, а относительная ширина полосы пропускания, измеренная по уровню -3 dB от уровня минимальных потерь, $\Delta f/f_0 = 16.8 \%$.

Экспериментальная проверка проведенных расчетов была проведена на опытном образце фильтра, изготовленном из диэлектрических пластин ТММ3 корпорации Rogers, имеющих толщину $h_1 = 5.08 \text{ mm}$ и размеры $300 \times 300 \text{ mm}$. Фотография слоистого фильтра представлена на рис. 3а, а увеличенные фрагменты его наружных и внутренних сеток показаны соответственно на рис. 3б и 3с. После изготовления медные сетки на поверхностях диэлектрических пластин были покрыты серебром для защиты от окисления. В собранном фильтре пластины скреплялись параллельно друг другу на расстоянии $h_2 = 11.15 \text{ mm}$ двумя парами небольших тефлоновых держателей. АЧХ опытного образца фильтра, представленная точками на рис. 2, регистрировалась на векторном анализаторе цепей ZVK фирмы Rohde & Schwarz (Германия) с помощью широкополосных измерительных антенн. Относительная ширина полосы пропускания экспериментального фильтра, измеренная по уровню -3 dB от уровня минимальных потерь, $\Delta f/f_0 = 16.5\%$, ее центральная частота $f_0 = 12.29 \text{ GHz}$, а минимальные потери в полосе пропускания 1.15 dB .

Таким образом, предложенная конструкция, состоящая из диэлектрических слоев, разделенных металлическими сетками, может служить полосно-пропускающим фильтром. Слои являются полуволновыми резонаторами, поэтому центральная частота полосы пропускания фильтра определяется толщиной и относительной диэлектрической проницаемостью слоев, а их количество определяет порядок фильтра. Важно отметить, что слои могут изготавливаться как из одного, так и из разных материалов.

Металлические сетки на поверхностях слоев являются зеркалами, отражательная способность которых зависит от периода полосковой структуры и ширины проводников. Это позволяет в широких пределах изменять связь резонаторов друг с другом, а крайних резонаторов со свободным пространством, что необходимо при конструировании многозвенных фильтров с заданной полосой пропускания. Очевидно, что из панелей, изготовленных на основе слоистых структур исследованного фильтра, можно конструировать радиопрозрачные поверхности для защиты антенн передатчиков и приемников. Важной особенностью таких радиопрозрачных поверхностей является тот факт, что они обладают дополнительно еще и высокими частотно-селективными свойствами.

Достаточно хорошее совпадение характеристик фильтра, рассчитанных на основе выведенных формул, с результатами измерений на опытном образце доказывает правомерность использованного в расчете квазистатического приближения [12], не требующего, как известно, высоких вычислительных ресурсов компьютера, в отличие от электродинамического анализа 3D моделей. Поэтому целесообразно параметрический синтез фильтра проводить с использованием программы квазистатического анализа конструкции, а затем полученную в результате синтеза 3D модель, при необходимости, можно подстроить в каком-либо пакете программ по электродинамическому анализу конструкции.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № RFMEFI57517X0142/

Список литературы

- [1] *Melo A. M., Kornberg M. A., Kaufmann P., Piazzetta M. H., Bortolucci E. C., Zakia M. B., Bauer O. H., Poglitsch A., Alves da Silva A. M. P.* Metal mesh resonant filters for terahertz frequencies. // *Appl. Opt.* 2008. V. 47. № 32 P. 6064.
- [2] *Garcia-Vidal F. J., Martin-Moreno L., Ebbesen T. W., Kuipers L.* Light passing through subwavelength apertures. // *Rev. of Modern Phys.*, 2010. V. 82, P. 729.
- [3] *Tomasek P.* Optimization of FSS Filters// *Int. J. of Circuits, Systems and Signal Processing.* 2014. V. 8. P. 594.
- [4] *Oh S., Lee H., Jung J-H., Lee G-Y.* A Novel Wideband Miniaturized-Element Frequency Selective Surface. // *Int. J. of Microwave Science and Technology.* 2014. V. 2014, Article number 857582.
- [5] *Ade P. A. R., Pisano G., Tucker C., Weaver S.* A Review of Metal Mesh Filters. // *Proc. SPIE.* 2006. V. 6275. P. 62750U-1.
- [6] *Zhou H., Qu S.-B., Wang J.-F., Lin B.-Q., Ma H., Xu Z., Bai P., Peng W.-D.* Ultra-wideband frequency selective surface. // *Electronics Lett.* 2012. V. 48. № 1. P. 11-12.

- [7] *Munk B. A.* Frequency selective surfaces: theory and design. New York: Wiley-Interscience. 2000.
- [8] *Belyaev B.A., Tyurnev V.V.* Multilayer bandpass filter with extended lower and upper stop bands. // Optics Letters. 2015. V. 40. No 18. P. 4333-4335.
- [9] *Abadi S. M. A. M. H., Behdad N.* Inductively-Coupled Miniaturized-Element Frequency Selective Surfaces with Narrowband, High-Order Bandpass Responses. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2015. V. 63. N 11. P. 4766-4774.
- [10] *Belyaev B.A., Tyurnev V.V.* Design of bandpass filters composed of dielectric layers separated by gratings of strip conductors. // Optics Letters. 2016. V. 41. No 3. P. 536-539.
- [11] *Гунта К., Гардж Р., Чадха Р.* Машинное проектирование СВЧ устройств. М.: Радио и связь, 1987.
- [12] *Беляев Б. А., Тюрнев В. В.* Рассеяние электромагнитных волн на металлической решетке, расположенной на границе раздела двух сред. // РЭ. 2017. Т. 62. № 7. С. 642-650.

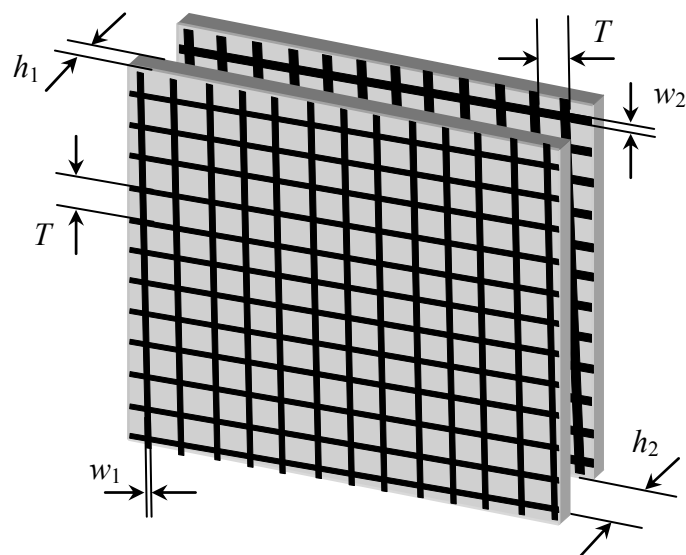
К статье: Б.А. Беляева и др. «**Микроволновый полосно-пропускающий фильтр на диэлектрических слоях с металлическими сетками**»

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Конструкция полосно-пропускающего фильтра третьего порядка на диэлектрических слоях с металлическими сетками.

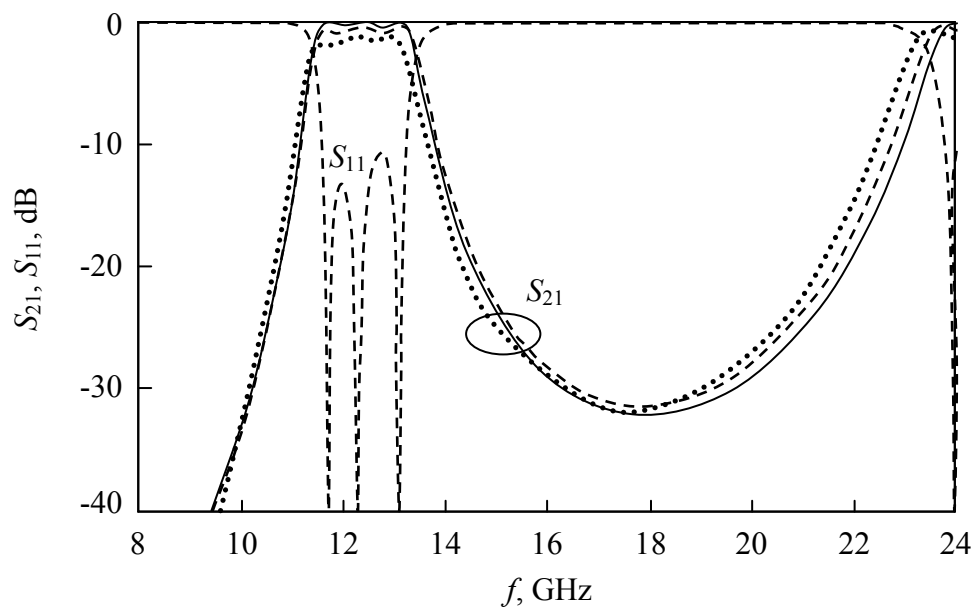
Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики фильтра третьего порядка на диэлектрических слоях с металлическими сетками. Сплошная линия – квазистатический расчет, штриховая линия – электродинамический анализ 3D модели, точки – эксперимент.

Рис. 3. Фотография опытного образца фильтра третьего порядка на диэлектрических слоях с металлическими сетками – (*a*) и увеличенные фрагменты его наружных – (*b*) и внутренних – (*c*) сеток.



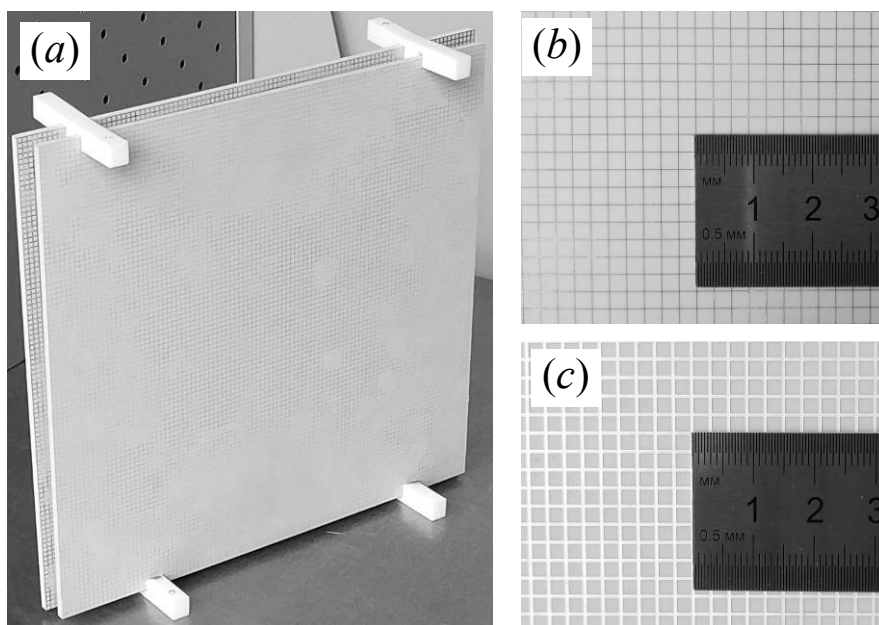
К статье: Б.А. Беяева и др. «Микроволновый полосно-пропускающий фильтр на диэлектрических слоях с металлическими сетками».

Рис. 1. Конструкция полосно-пропускающего фильтра третьего порядка на диэлектрических слоях с металлическими сетками.



К статье: Б.А. Беляева и др. «Микроволновый полосно-пропускающий фильтр на диэлектрических слоях с металлическими сетками».

Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики фильтра третьего порядка на диэлектрических слоях с металлическими сетками. Сплошная линия – квазистатический расчет, штриховая линия – электродинамический анализ 3D модели, точки – эксперимент.



К статье: Б.А. Беяева и др. «Микроволновый полосно-пропускающий фильтр на диэлектрических слоях с металлическими сетками».

Рис. 3. Фотография опытного образца фильтра третьего порядка на диэлектрических слоях с металлическими сетками – (a) и увеличенные фрагменты его наружных – (b) и внутренних – (c) сеток.