

Фотонные структуры и их использование для измерения параметров материалов

Д.А.Усанов, А.В.Скрипаль, А.В.Абрамов, А.С.Боголюбов, М.Ю.Куликов

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Проведено компьютерное моделирование и экспериментальное исследование частотных зависимостей коэффициентов пропускания фотонных кристаллов на основе микрополосковых линий при наличии нарушения их периодичности в виде изменения геометрических размеров микрополоска и диэлектрической проницаемости подложки одного из чередующихся отрезков микрополосковой линии в диапазоне 0–20 ГГц. Получено хорошее количественное совпадение результатов расчета с экспериментом. Показана возможность использования открытых СВЧ-линий передачи – микрополосковых фотонных структур – для реализации метода измерения параметров материала образцов заданной геометрической формы и определенных размеров, выполняющих функцию неоднородности в фотонной структуре.

Интенсивное развитие нанотехнологий стимулировало разработку и создание нового класса периодических структур, получивших название фотонных кристаллов [1]. Эти структуры состоят из периодически чередующихся слоев, размеры которых сравнимы с длиной волны распространяющегося в них электромагнитного излучения. В спектре пропускания такой структуры имеется частотная область, запрещенная для распространения электромагнитной волны – аналог запрещенной зоны в кристаллах. По аналогии с реальными кристаллами при наличии нарушений в периодичности слоистой структуры в запрещенной зоне фотонного кристалла могут появляться узкие «окна» прозрачности [2, 3]: «донорные» окна, расположенные вблизи верхней частотной границы запрещенной зоны, или «акцепторные» окна, расположенные вблизи ее нижней частотной границы [2].

В СВЧ-диапазоне одномерный фотонный кристалл может быть реализован как с помощью волноводов с диэлектрическим заполнением [4, 5], так и планарных линий передачи с периодически изменяющейся структурой [6–8]. На основе СВЧ-фотонных кристаллов созданы полосовые фильтры, перестраиваемые резонаторы, миниатюрные антенны [4, 9–11]. Известна высокая чувствительность частотной зависимости «окон» прозрачности в запрещенной зоне фотонного кристалла к нарушению периодичности в слоистой структуре. В [5, 12] показана возможность использования этого свойства фотонных кристаллов на основе волноводной конструкции для контроля диэлектрической проницаемости слоистых диэлектриков и параметров нанометровых металлических слоев на изолирующих подложках.

В настоящей работе приведены результаты компьютерного моделирования и экспериментального исследования частотных характеристик открытых СВЧ-линий передачи – фотонных структур – в диапазоне 0–20 ГГц. Обсуждается возможность их использования для реализации метода измерения параметров материала, который выполняет функцию неоднородности в фотонной структуре.

Теоретическое описание. Рассматривается фотонная структура, реализованная в виде последовательно соединенных отрезков микрополосковой линии передачи с периодически изменяющейся шириной верхнего полоска (рис.1). Фотонный кристалл на основе микрополосковой линии, являющийся четырехполосником сложной структуры, может быть представлен каскадным соединением элементарных четырехполосников с известными матрицами передачи, каждый из которых описывает отдельный отрезок микрополосковой линии передачи и прямое соединение каждой из пар отрезков с различной шириной верхнего полоска.

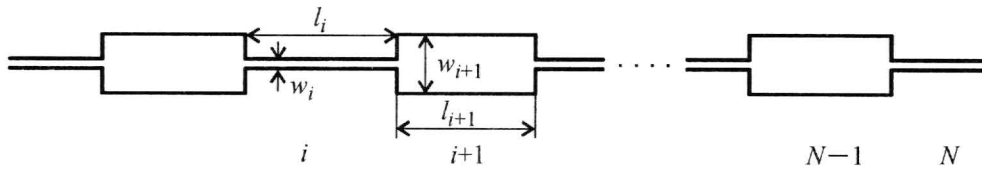


Рис.1. Структура фотонного кристалла на основе микрополосковой линии: w_i – ширина верхнего i -го полоска, l_i – длина i -го отрезка верхнего полоска

Для расчета коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны через фотонный кристалл на основе микрополосковой линии в квазистатическом приближении использовалась матрица передачи \mathbf{T} четырехполосника сложной структуры, которая имеет вид

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} T[1,1] & T[1,2] \\ T[2,1] & T[2,2] \end{pmatrix} = \mathbf{T}'_N \prod_{i=1}^{N-1} (\mathbf{T}''_{i,i+1} \mathbf{T}'_i), \quad (1)$$

где \mathbf{T}'_i – матрица передачи четырехполосника, описывающего i -й отрезок микрополосковой линии передачи; $\mathbf{T}''_{i,i+1}$ – матрица передачи четырехполосника, описывающего прямое соединение ее i -го и $i+1$ -го отрезков.

Выражения для матриц передачи \mathbf{T}'_i и $\mathbf{T}''_{i,j}$ соответствующих элементарных четырехполосников имеют вид [13]

$$\mathbf{T}'_i = \begin{pmatrix} e^{\gamma_i l_i} & 0 \\ 0 & e^{-\gamma_i l_i} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{T}''_{i,i+1} = \begin{pmatrix} \frac{R_{i,i+1} + 1}{2\sqrt{R_{i,i+1}}} & \frac{R_{i,i+1} - 1}{2\sqrt{R_{i,i+1}}} \\ \frac{R_{i,i+1} - 1}{2\sqrt{R_{i,i+1}}} & \frac{R_{i,i+1} + 1}{2\sqrt{R_{i,i+1}}} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Здесь l_i – длина i -го отрезка; γ_i – постоянная распространения электромагнитной волны в i -м отрезке; $R_{i,i+1} = \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i}$, ρ_i – волновое сопротивление i -го отрезка микрополоска.

Рассчитав матрицу передачи \mathbf{T} фотонной структуры, являющейся четырехполосником, с использованием выражений (1)–(3) определяем коэффициент прохождения СВЧ-мощности через элемент $T[1,1]$ матрицы передачи:

$$t = \frac{1}{|T[1,1]|^2}. \quad (4)$$

Коэффициент отражения СВЧ-мощности от фотонной структуры определяется квадратом модуля элемента $S[1,1]$ матрицы рассеяния

$$r = |S[1,1]|, \quad (5)$$

элементы которой связаны с элементами матрицы передачи T соотношением

$$S = \begin{pmatrix} S[1,1] & S[1,2] \\ S[2,1] & S[2,2] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{T[2,1]}{T[1,1]} & \frac{T[1,1] \cdot T[2,2] - T[1,2] \cdot T[2,1]}{T[1,1]} \\ \frac{1}{T[1,1]} & -\frac{T[1,2]}{T[1,1]} \end{pmatrix}.$$

Отметим, что элементарные четырехполюсники (2) и (3) являются обратимыми и между элементами матриц рассеяния этих четырехполюсников выполняется соотношение $S[1,2] = S[2,1]$, а определитель матриц передачи $|T| = T[1,1] \cdot T[2,2] - T[1,2] \cdot T[2,1] = 1$.

Компьютерное моделирование. В ходе компьютерного моделирования рассматривалась фотонная структура, состоящая из семи последовательно соединенных чередующихся отрезков микрополосковой линии передачи с большой и малой шириной верхнего полоска, включенная в 50-омную линию передачи. Ширина верхнего полоска фотонной структуры первого, третьего, пятого и седьмого отрезков составляла 2,5 мм, второго, четвертого и шестого – 0,5 мм. Длина широких отрезков составляла 7 мм, узких – 7,6 мм. Диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon = 9,6$.

Частотная зависимость коэффициента пропускания моделируемой фотонной структуры в диапазоне частот от 0 до 20 ГГц, полученная с использованием описанной выше модели и методики расчета в квазистатическом приближении [13] (рис.2, кривая 1), характеризуется наличием частотных областей, запрещенных для распространения электромагнитной волны – аналог запрещенной зоны в кристаллах. На рисунке также приведены результаты расчетов частотной зависимости коэффициен-

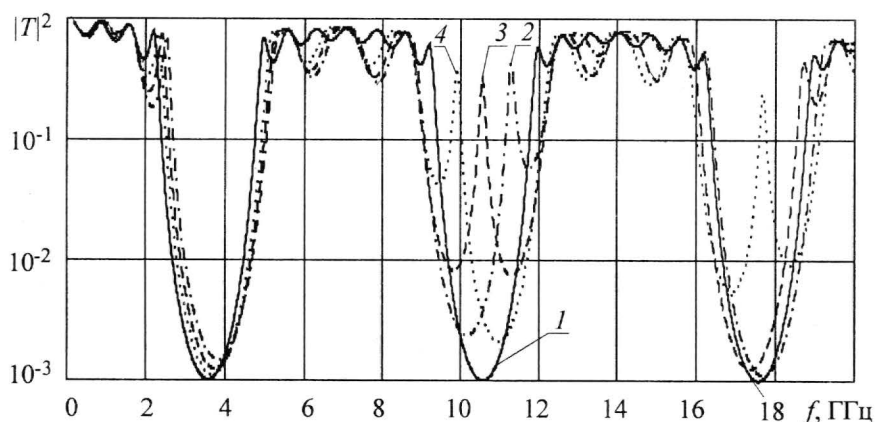


Рис.2. Частотные зависимости квадрата модуля коэффициента пропускания фотонной структуры с нарушением периодичности для различных значений длины l_4 4-го отрезка (отрезок с меньшей шириной): кривая 1 соответствует фотонному кристаллу без нарушений; кривые 2 – $l_4 = 4,2$ мм; 3 – $l_4 = 5,1$ мм; 4 – $l_4 = 6,0$ мм

та пропускания фотонной структуры $|T|^2$ при наличии в ней нарушения в виде одного (четвертого) отрезка меньшей длины l_4 (кривые 2, 3, 4). В этом случае на частотной зависимости коэффициента пропускания появляется узкое «окно» прозрачности в запрещенной для распространения электромагнитной волны частотной области, местоположение которого можно регулировать, изменяя длину этого отрезка.

Нарушение периодичности фотонной структуры может быть создано как изменением ширины микрополоска, так и изменением диэлектрической проницаемости подложки одного из чередующихся отрезков микрополосковой линии, приводящим к изменению постоянной распространения волны. При наличии в фотонной структуре участка с диэлектрической проницаемостью подложки ϵ , отличной от диэлектрической проницаемости остальных участков, на зависимости $|T(f)|^2$ появляется узкое «окно» прозрачности в запрещенной для распространения электромагнитной волны частотной области, местоположение которого зависит от величины ϵ .

Результаты вычисления зависимостей $|T(f)|^2$ для фотонной структуры с «окном» прозрачности при различных значениях диэлектрической проницаемости ϵ_4 одного из слоев аналогичны представленным на рис.2.

По аналогии с реальными кристаллами создание описанных выше нарушений в фотонных структурах также приводит к появлению в запрещенной зоне «донорных» окон прозрачности, расположенных вблизи верхней частотной границы запрещенной зоны (см. рис.2, кривая 2), или «акцепторных» окон, расположенных вблизи нижней частотной границы запрещенной зоны (кривая 4).

Экспериментальные результаты. Экспериментально исследовались одномерные фотонные структуры с подложкой из поликора (Al_2O_3), представляющие собой последовательно соединенные чередующиеся отрезки микрополосковой линии передачи с большой и малой шириной полоскового проводника и изготовленные в соответствии с параметрами, заложенными в теоретической модели. В эксперименте использовался коаксиально-микрополосковый адаптер (рис.3,а). Измерения проводились с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-L Network Analyzer N5230A.

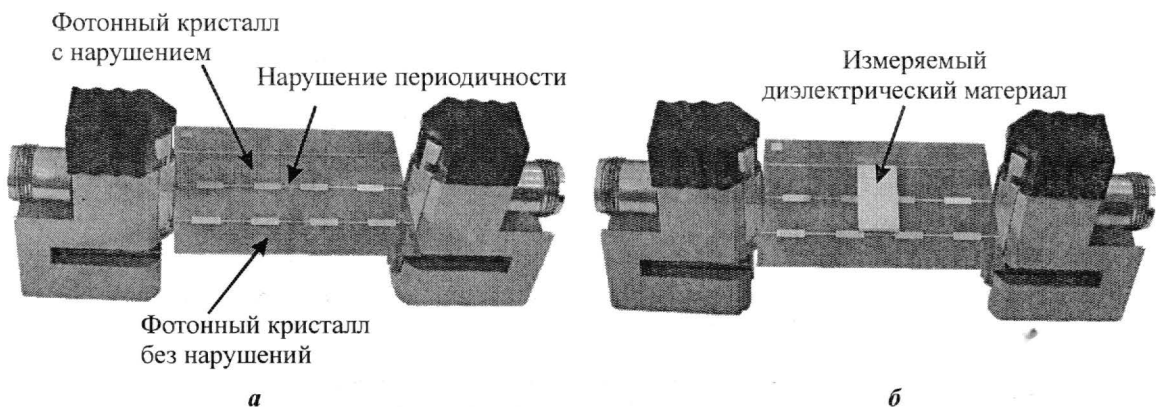


Рис.3. Фотонные структуры в коаксиально-микрополосковом адаптере (а) и расположение измеряемого диэлектрического образца (б)

В диапазоне частот 0–20 ГГц измерена частотная зависимость модуля коэффициента прохождения $|T(f)|^2$ электромагнитной волны, взаимодействующей с исследуемой фотонной структурой на основе 7-слойной микрополосковой линии, характеризующаяся наличием частотных областей, запрещенных для распространения электромагнитной волны (рис.4, кривая 1). Приведена расчетная зависимость $|T(f)|^2$ (рис.4, кривая 2), полученная с использованием описанной выше модели и методики расчета в квазистатическом приближении.

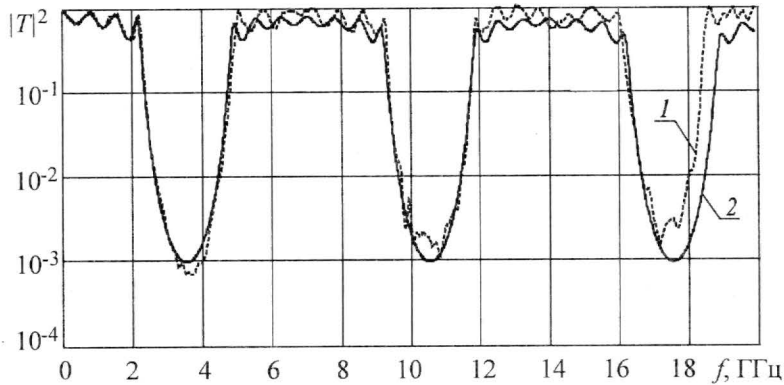


Рис.4. Экспериментальная (кривая 1) и расчетная (кривая 2) зависимости $|T(f)|^2$ фотонной структуры на основе периодической 7-слойной микрополосковой линии

В исследуемой структуре было создано нарушение периодичности в виде меньшей длины l_4 четвертого высокоомного отрезка микрополосковой линии передачи ($l_4 = 5,1$ мм). Наличие такого нарушения привело к возникновению «окна» прозрачности в запрещенной зоне фотонной структуры с центральной частотой 10,5 ГГц. На рис.5 представлены экспериментальная и расчетная (полученная с использованием описанной выше модели и методики расчета в квазистатическом при-

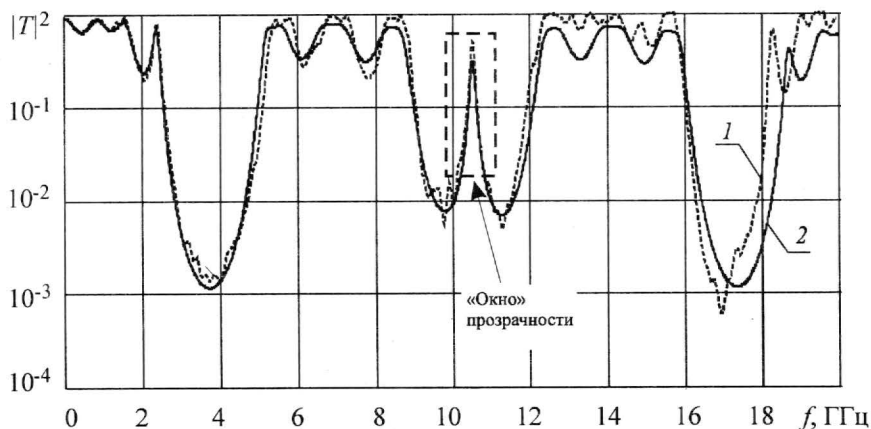


Рис.5. Экспериментальная (кривая 1) и расчетная (кривая 2) зависимости $|T(f)|^2$ фотонного кристалла на основе периодической 7-слойной микрополосковой структуры при наличии нарушения ее периодичности

ближении) частотные зависимости коэффициента пропускания фотонного кристалла на основе 7-слойной микрополосковой структуры при наличии нарушения ее периодичности.

Поскольку нарушение периодичности фотонной структуры может быть создано реализацией какой-либо ситуации, при которой изменяется постоянная распространения электромагнитной волны на отдельном отрезке фотонной структуры вследствие изменения эффективной диэлектрической проницаемости подложки на этом отрезке, исследована возможность реализации достаточно простого способа управления положением «окна» прозрачности в запрещенной зоне фотонной структуры. Исследована частотная зависимость «окна» прозрачности в запрещенной зоне (диапазон частот 9–12 ГГц) фотонной структуры при размещении над четвертым высокоомным отрезком микрополосковой линии образцов с фиксированными размерами $23 \times 10 \times 2$ мм и различной диэлектрической проницаемостью ϵ симметрично относительно полоска, что приводит к изменению постоянной распространения электромагнитной волны на отдельном отрезке фотонной структуры.

Результаты измерений частотных зависимостей «окна» прозрачности в запрещенной зоне фотонной структуры от диэлектрической проницаемости ϵ образцов с фиксированными размерами $23 \times 10 \times 2$ мм, размещаемых над четвертым высокоомным отрезком микрополосковой линии симметрично относительно полоска, приведены на рис.6.

Сопоставление результатов расчетов с экспериментом свидетельствует об их хорошем количественном совпадении. Это позволяет использовать фотонные структуры для измерения параметров материала, выполняющего функцию неоднородности в фотонной структуре, путем решения соответствующей обратной задачи подобно тому, как это было описано в [14, 15]. В настоящей работе, в отличие от [14, 15], исследуемый материал находится в открытой для внешних воздействий системе, что может быть использовано для измерения реакции этого материала на эти воздействия.

Как и предполагалось, вид частотной зависимости «окна» прозрачности в запрещенной зоне фотонной структуре с нарушением периодичности сильно зависит от диэлектрической проницаемости исследуемых образцов заданной геометрической формы и определенных размеров (см. рис.6).

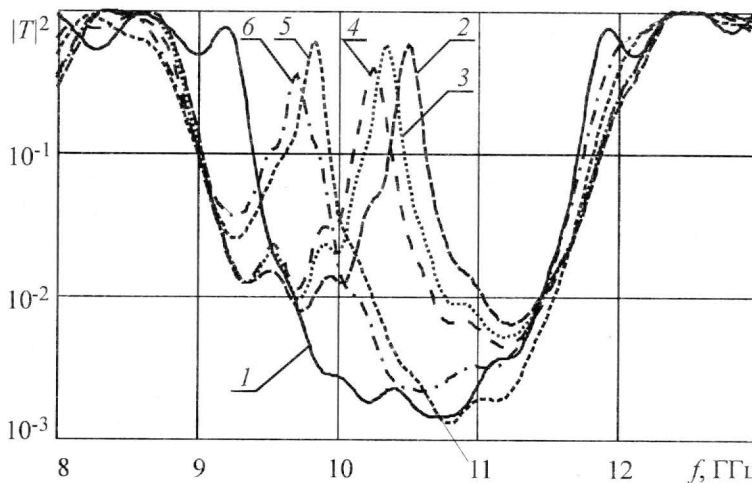


Рис.6. Экспериментальные зависимости $|T(f)|^2$ фотонной структуры при наличии нарушения ее периодичности в виде изменения длины четвертого слоя $l_4 = 5,1$ мм для различных значений ϵ образцов, размещаемых над четвертым высокоомным отрезком микрополосковой линии: кривая 3 – $\epsilon = 2,1$, кривая 4 – $\epsilon = 2,5$, кривая 5 – $\epsilon = 9,6$, кривая 6 – $\epsilon = 11,8$. Кривая 1 соответствует фотонной структуре без нарушений; кривая 2 – с нарушением при отсутствии измеряемого образца

В результате проведенных исследований получено хорошее количественное совпадение результатов компьютерного моделирования СВЧ-характеристик фотонных структур с использованием методики расчета, основанной на описании этих характеристик в квазистатическом приближении с помощью матрицы передачи четырехполюсника сложной структуры, с результатами экспериментальных исследований частотных характеристик открытых СВЧ-линий передачи – фотонных структур в диапазоне 0–16 ГГц. Теоретически и экспериментально исследованы особенности частотных зависимостей коэффициентов пропускания фотонных кристаллов на основе микрополосковой структуры при наличии нарушения ее периодичности в виде изменения геометрических размеров микрополоска и диэлектрической проницаемости подложки одного из чередующихся отрезков микрополосковой линии. Показана возможность использования открытых СВЧ-линий передачи – микрополосковых фотонных структур для реализации метода измерения параметров материала образцов заданной геометрической формы и определенных размеров, выполняющих функцию неоднородности на отдельном отрезке фотонной структуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект №1.4.08 № гос. регистрации 0120.0801702), гранта Президента РФ для поддержки молодых российских ученых МК-2083.2007.8 и МК-2205.2008.8).

Литература

1. **Yablonovitch E.** Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics // *Phys. Rev. Lett.* – 1987. – Vol. 58, N 20. – P. 2059–2062.
2. Donor and acceptor modes in photonic band structure / **Yablonovitch E., Gmitter T.J., Meade R.D. et al.** // *Phys. Rev. Lett.* – 1991. – Vol. 67, N 24. – P. 3380–3383.
3. Properties of Liquids and Liquid Crystals in Nano-Scale Space / **Katsumi Yoshino, Ryotaro Ozaki, Jun Matsumoto et al.** // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.* – 2006. – Vol. 13, N 3. – P.678–686.
4. **Kuriazidou C.A., Contopanagos H.F., Alexopoulos N.G.** Monolithic waveguide filters using printed photonic-bandgap materials // *IEEE Transactions on microwave theory and techniques.* – 2001. – Vol. 49, N 2. – P. 297–306.
5. **Dmitry Usanov, Alexander Skripal, Anton Abramov, Anton Bogolubov, Vladimir Skvortsov, Merdan Merdanov.** Measurement of the Metal Nanometer Layer Parameters on Dielectric Substrates using Photonic Crystals based on the Waveguide Structures with Controlled Irregularity in the Microwave Band // *Proc. of 37-rd European Microwave Conference. Munich, Germany. 8–12th October 2007.* – 2007. – P. 198–201.
6. **Duchamp J.M., Perrier A.L., Ferrari P.** MS, CPW and Fin-line attenuators and dispersion effects on microwave and millimeter wave PBG structure parameters // *Proc. of 34-rd European Microwave Conf. (Amsterdam, Netherlands, 12–14-th October 2004).* – 2004. – Vol. 2. – P. 877–880.
7. **Tae-Yeoul and Kai Chang.** Uniplanar one-dimensional photonic-bandgap structures and resonators // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* – 2001. – Vol. 49, N 3. – P. 549–553.
8. **Chul-Sik Kee, Jae-Eun Kim, Hae Yong Park, and H. Lim.** Roles of Wave Impedance and Refractive Index in Photonic Crystals with Magnetic and Dielectric Properties / *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* – 1999. – Vol. 47, N 11. – P. 2148–2150.
9. **Crystal Gerard W. Burns, Thayne I.G., Arnold J.M.** Improvement of Planar Antenna Efficiency When Integrated With a Millimetre-Wave Photonic // *Proc. of European Conf. on Wireless Technology (Amsterdam, Netherlands, 11–12-th October 2004).* – 2004. – P. 229–232.
10. **Pattern Hsien-Shun Wu, Ching-Kuang C. Tzuang** Miniaturized High-Gain Synthetic Rectangular Waveguide Antenna of Near-Omnidirectional Radiation // *Proc. of 34-rd European Microwave Conf. (Amsterdam, Netherlands, 12–14-th October 2004).* – 2004. – Vol. 2. – P. 1189–1192.
11. **Беляев Б.А., Волошин А.С., Шабанов В.Ф.** Исследование микрополосковых аналогов полосо-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах // *Радиотехника и электроника.* – 2006. – Т. 51, № 6. – С. 694–701.

12. *Oliylik V., Makarov D., Danilov V.* Dielectric permeability measurements with waveguide bragg structure usage // Proc. of 15-th-Int. Crimean Conf. «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2005) (Sevastopol, Crimea, Ukraine 12–16 September 2005.). – 2005. – P. 785, 786.

13. *Малорацкий Л.Г., Явич Л.Р.* Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях. – М.: Сов. радио, 1972. – 232 с.

14. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С.* Измерения толщины нанометровых слоев металла и электропроводности полупроводника в структурах металл–полупроводник по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения // ЖТФ. – 2006. – Т. 76. – Вып. 5. – С. 112–117.

15. *Usanov D.A., Skripal A.V., Abramov A.V., Bogolyubov A.S., Kalinina N.V.* Measurements of thickness of metal films in sandwich structures by the microwave reflection spectrum // Proc. of 36-rd European Microwave Conference (Manchester, UK. 10–15-th September 2006). – 2006. – P. 921–924.

Статья поступила
7 апреля 2008 г.

Усанов Дмитрий Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой физики твердого тела, проректор по НИР СГУ им. Н.Г. Чернышевского. *Область научных интересов:* твердотельная, микро- и наноэлектроника, радиофизика.

Скрипаль Александр Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела СГУ им. Н.Г. Чернышевского. *Область научных интересов:* твердотельная, микро- и наноэлектроника, радиофизика.

Абрамов Антон Валерьевич – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры физики твердого тела СГУ им. Н.Г. Чернышевского. *Область научных интересов:* физика полупроводников, твердотельная электроника.

Боголюбов Антон Сергеевич – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры физики твердого тела СГУ им. Н.Г. Чернышевского. *Область научных интересов:* физика полупроводников, твердотельная электроника.

Куликов Максим Юрьевич – аспирант кафедры физики твердого тела СГУ им. Н.Г. Чернышевского. *Область научных интересов:* физика полупроводников, твердотельная электроника.

Информация для читателей журнала

«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Вы можете оформить подписку на 2009 г. в редакции с любого номера.

Стоимость одного номера – 600 руб. (с учетом всех налогов и почтовых расходов).

Адрес редакции: 124498, Москва, Зеленоград, проезд 4806, д. 5, МИЭТ, комн. 7232

Тел.: (495) 534-62-05. Факс: (495) 530-54-29. E-mail: magazine@rnd.miee.ru

<http://www.miet.ru/static/je/os.html>