

---

# Оптически управляемые элементы на основе фотонных кристаллов СВЧ-диапазона



*А.В. Скрипаль*

Russia

***Saratov State University  
named after N.G. Chernyshevsky***

---

The Laboratory “Metamaterials”



# Оптически управляемые элементы на основе фотонных кристаллов СВЧ-диапазона

---

- **Введение**
- Фотонные кристаллы СВЧ-диапазона
- Теоретическое описание
- Компьютерное моделирование характеристик фотонных кристаллов СВЧ-диапазона
- Оптически управляемые элементы на основе фотонных кристаллов СВЧ-диапазона
  - Результаты компьютерного моделирования
- Заключение и выводы



# Введение

---

## □ Фотонные кристаллы :

- Интенсивное развитие нанотехнологий стимулировало разработку и создание нового класса периодических структур, получивших название фотонных кристаллов.
- 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.

# Введение

---

## □ Фотонные кристаллы :

- По аналогии с реальными кристаллами при наличии нарушений в периодичности слоистой структуры в запрещенной зоне фотонного кристалла могут появляться узкие «окна» прозрачности:
- «донорные», расположенные вблизи верхней частотной границы запрещенной зоны, или «акцепторные» окна, расположенные вблизи нижней частотной границы запрещенной зоны.



# Введение

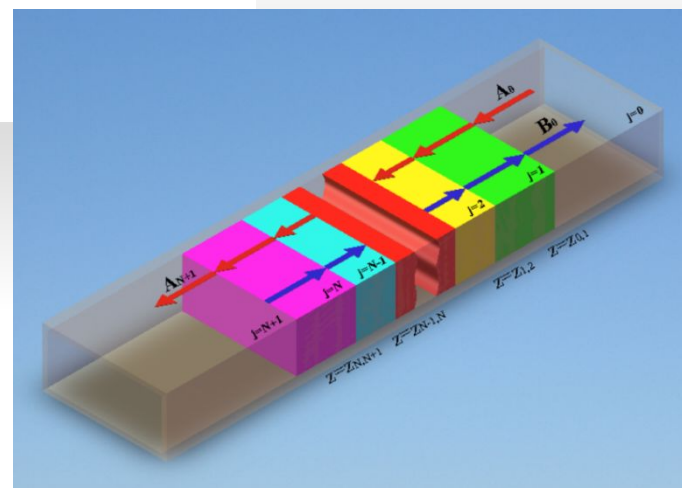
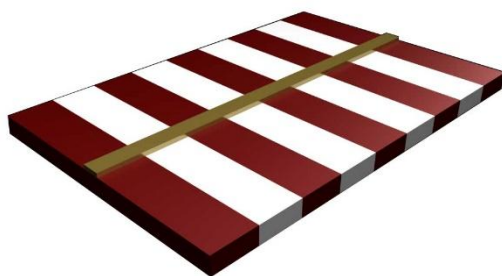
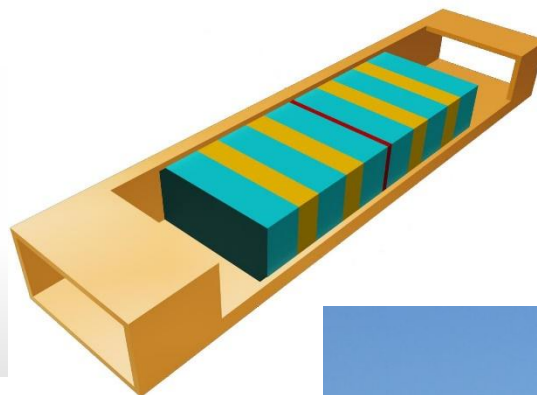
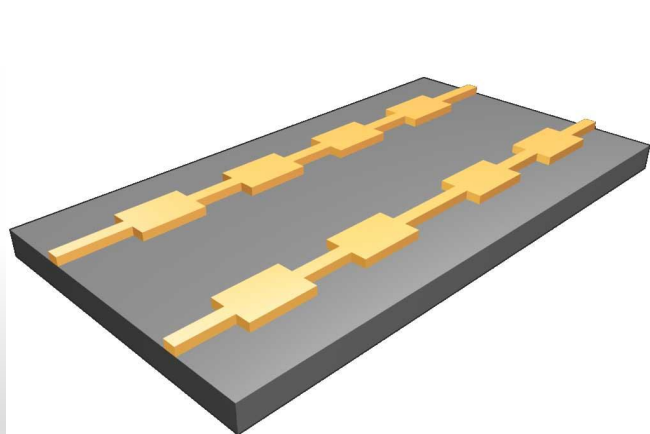
---

## □ Фотонные кристаллы :

- В СВЧ-диапазоне одномерный фотонный кристалл может быть реализован как с помощью волноводов с диэлектрическим заполнением, так и планарных линий передачи с периодически изменяющейся структурой.
- На основе СВЧ-фотонных кристаллов созданы полосовые фильтры, перестраиваемые резонаторы, миниатюрные антенны.



# Фотонные кристаллы СВЧ-диапазона

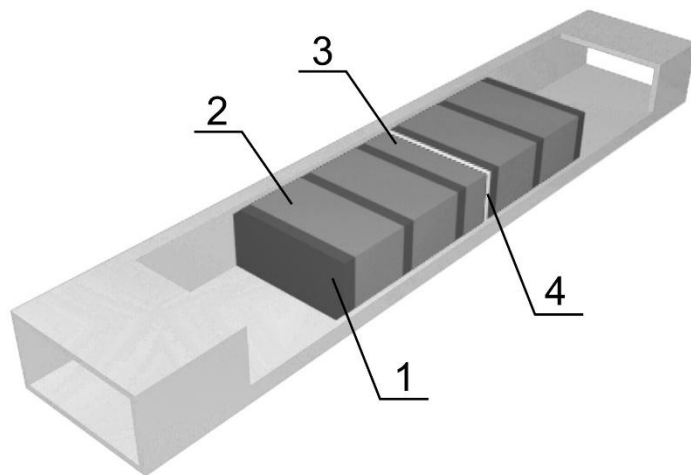


Микрополосковые

Волноводные

# Фотонные кристаллы СВЧ-диапазона

---

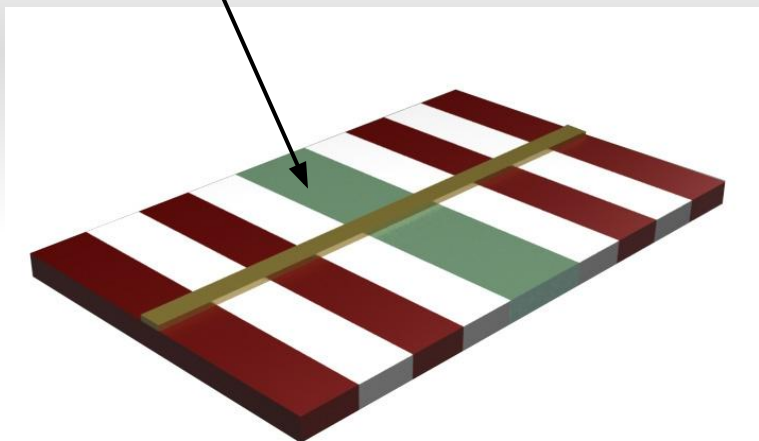


Одномерный волноводный фотонный кристалл с нарушением:  
1 –  $Al_2O_3$  керамика, 2 – воздух,  
3, 4 – нарушения в фотонном кристалле

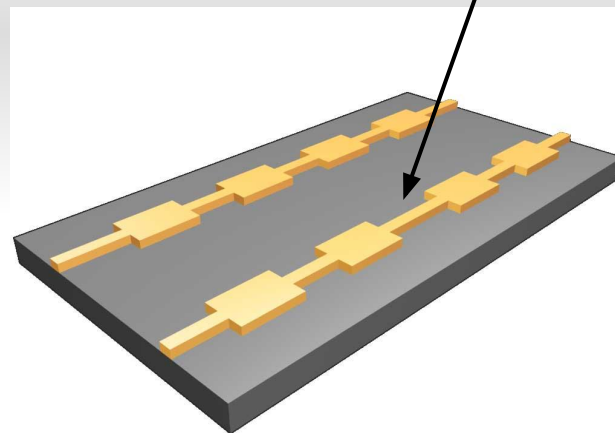
# Фотонные кристаллы СВЧ-диапазона

Нарушение периодичности фотонного кристалла 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.

*Нарушение*



*Нарушение*





# Теоретическое описание

---

- Закон дисперсии блоховской электромагнитной волны, распространяющейся по нормали к слоям, имеет вид

$$\cos(ka) = \cos(k_a a) \cdot \cos(k_b b) - \frac{1}{2} \left( \frac{\sqrt{\varepsilon_a}}{\sqrt{\varepsilon_b}} + \frac{\sqrt{\varepsilon_b}}{\sqrt{\varepsilon_a}} \right) \cdot \sin(k_a a) \cdot \sin(k_b b)$$

# Теоретическое описание

---

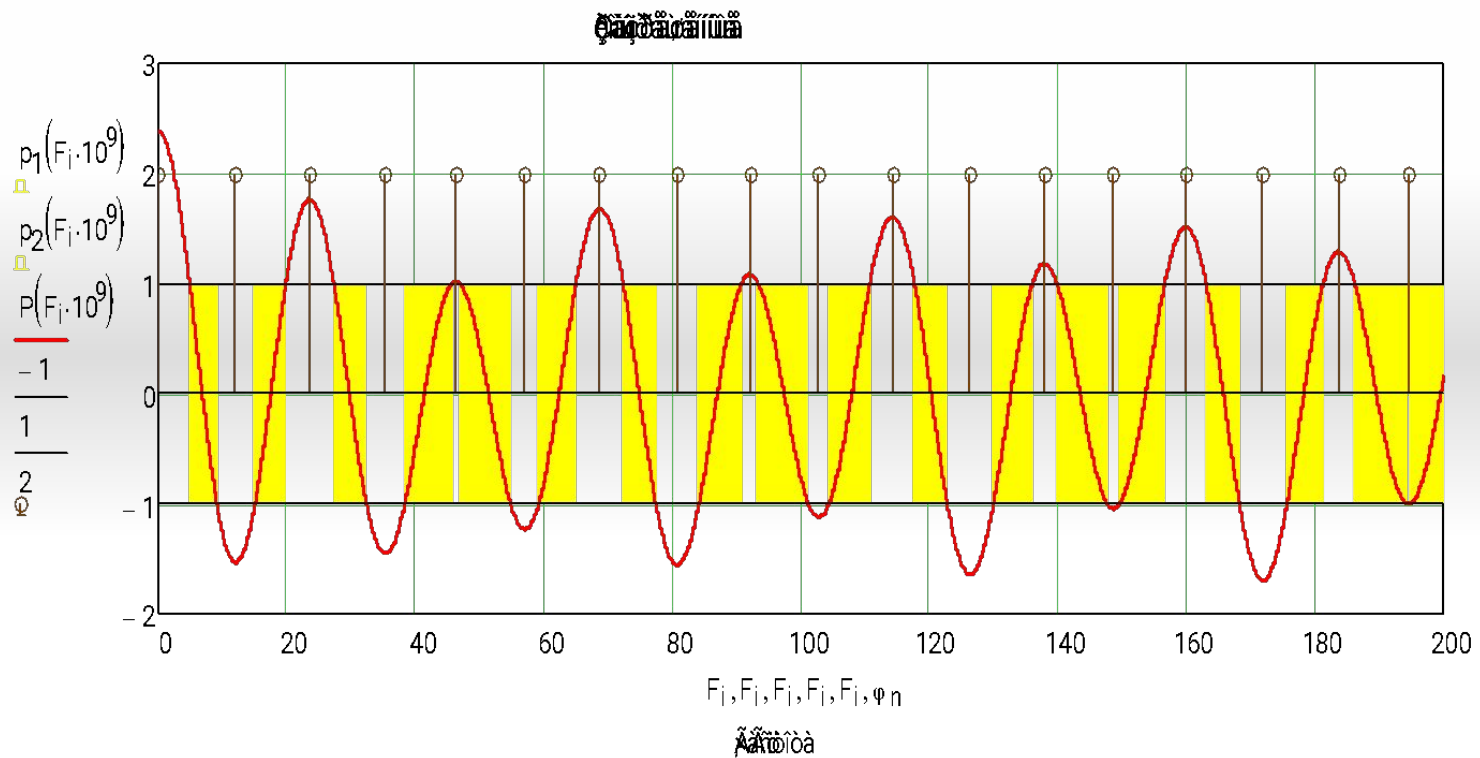
- Определение центра первой запрещенной энергетической зоны

$$\omega = qc / \sqrt{\varepsilon}$$

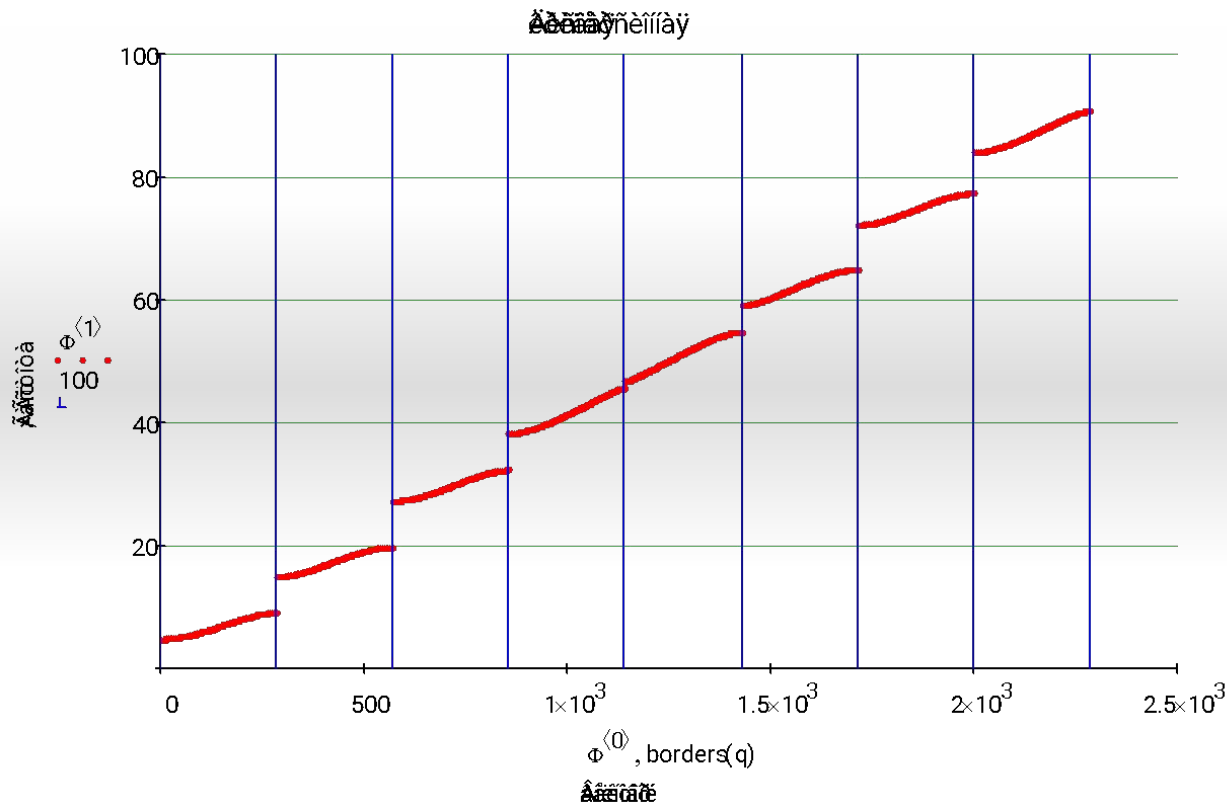
$$q = m\pi / a$$

$$\omega_{\text{рез}} = m\pi c / a\sqrt{\varepsilon}$$

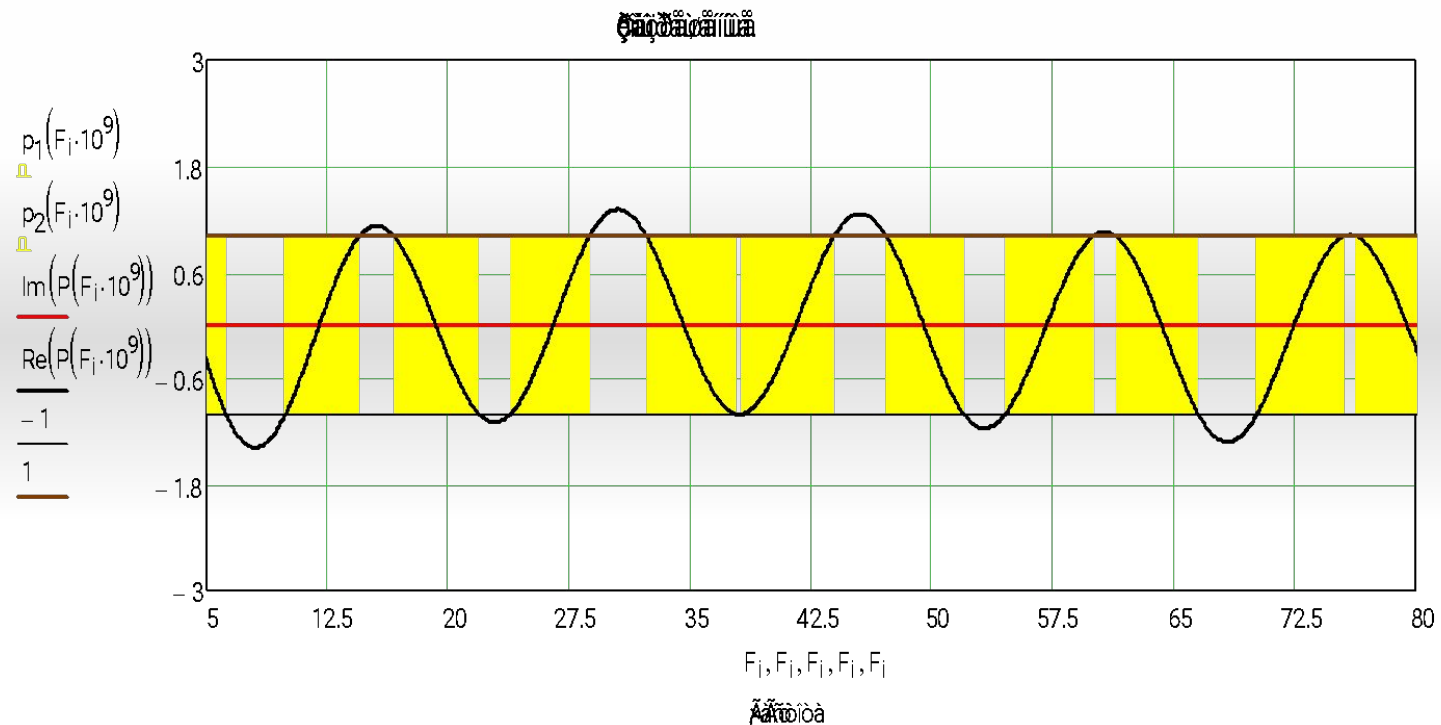
# Результаты компьютерного моделирования характеристик оптически управляемых элементов на основе фотонных кристаллов СВЧ-диапазона



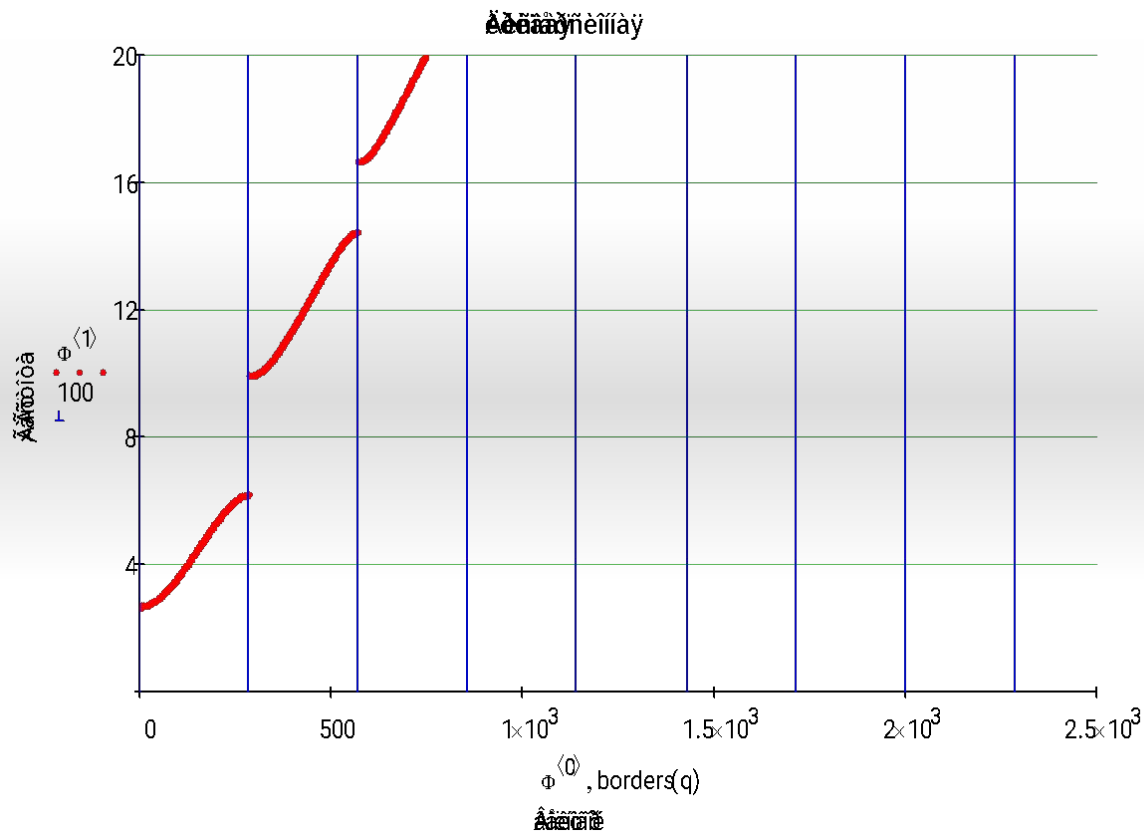
# Результаты компьютерного моделирования характеристик оптически управляемых элементов на основе фотонных кристаллов СВЧ-диапазона



# Результаты компьютерного моделирования характеристик оптически управляемых элементов на основе фотонных кристаллов СВЧ-диапазона



# Результаты компьютерного моделирования характеристик оптически управляемых элементов на основе фотонных кристаллов СВЧ-диапазона



# Теоретическое описание

$$\mathbf{T}(z_{j,j+1}) = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1} - \gamma_j)z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1} + \gamma_j)z_{j,j+1}} \\ \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1} + \gamma_j)z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1} - \gamma_j)z_{j,j+1}} \end{pmatrix}$$

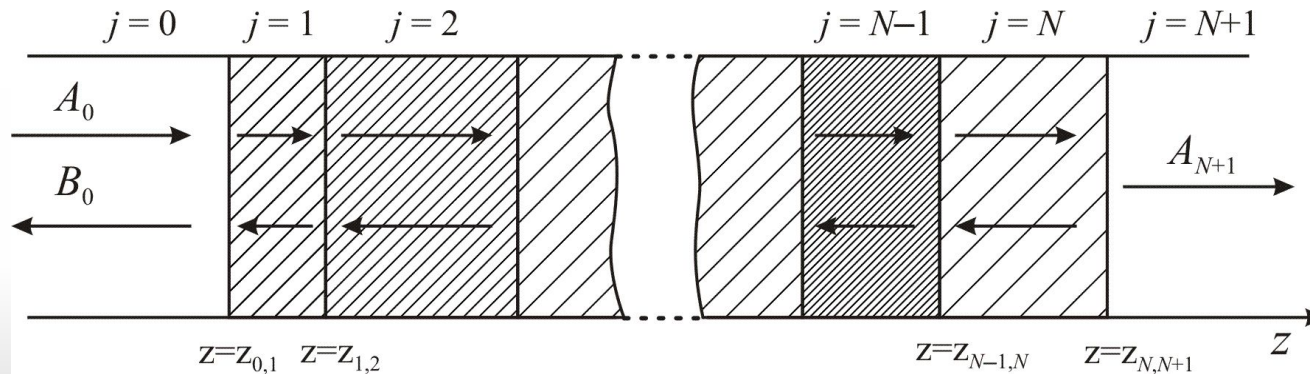
$$\gamma_0 = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0} \quad \gamma_{\Pi, M} = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_{\Pi, M}^* \varepsilon_0 \mu_{\Pi, M} \mu_0} \quad \gamma_D = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_D \varepsilon_0 \mu_0}$$

$$\varepsilon_{\Pi, M}^* = \varepsilon'_{\Pi, M} - j\varepsilon''_{\Pi, M}$$

$$\varepsilon'_{\Pi, M} = \varepsilon_{\Pi, M} - \frac{\sigma_{\Pi, M}^2 m_{\Pi, M}^*}{\varepsilon_0 e^2 n_{\Pi, M}}$$

$$\varepsilon''_{\Pi, M} = \sigma_{\Pi, M} / \varepsilon_0 \omega$$

# Теоретическое описание



Матрица передачи волны через структуру, состоящую из N слоёв

$$\mathbf{T}_N = \begin{pmatrix} \mathbf{T}_N[1,1] & \mathbf{T}_N[1,2] \\ \mathbf{T}_N[2,1] & \mathbf{T}_N[2,2] \end{pmatrix} = \prod_{j=N}^0 \mathbf{T}_{j,(j+1)} = \mathbf{T}(z_{N,N+1}) \cdot \mathbf{T}(z_{N-1,N}) \dots \mathbf{T}(z_{1,2}) \cdot \mathbf{T}(z_{0,1})$$

$$R = -\frac{\mathbf{T}_N[2,1]}{\mathbf{T}_N[2,2]}$$

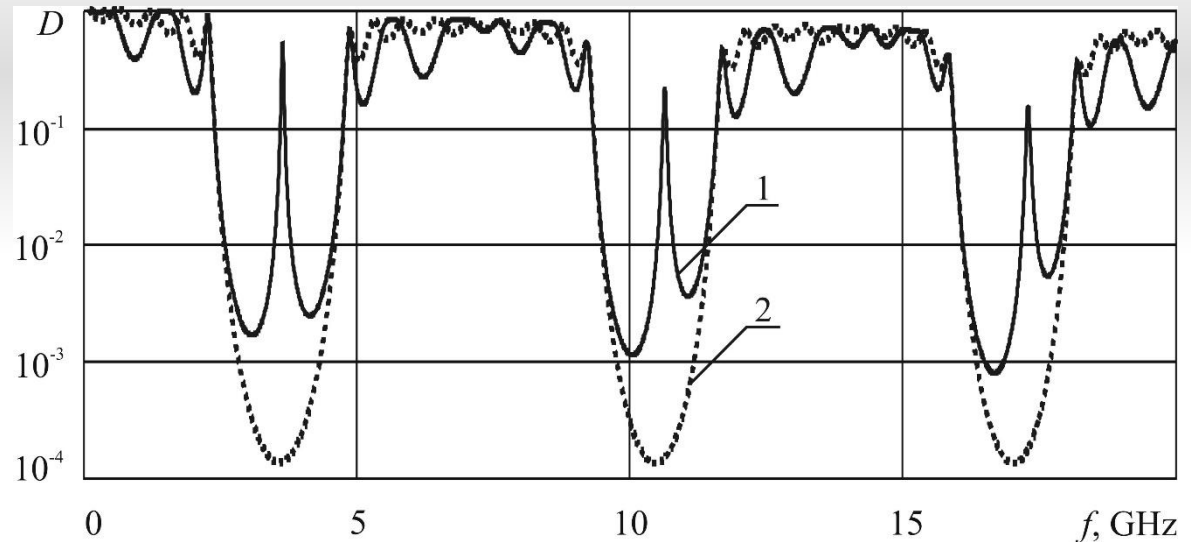
$$T = \frac{\mathbf{T}_N[1,1] \cdot \mathbf{T}_N[2,2] - \mathbf{T}_N[1,2] \cdot \mathbf{T}_N[2,1]}{\mathbf{T}_N[2,2]}$$



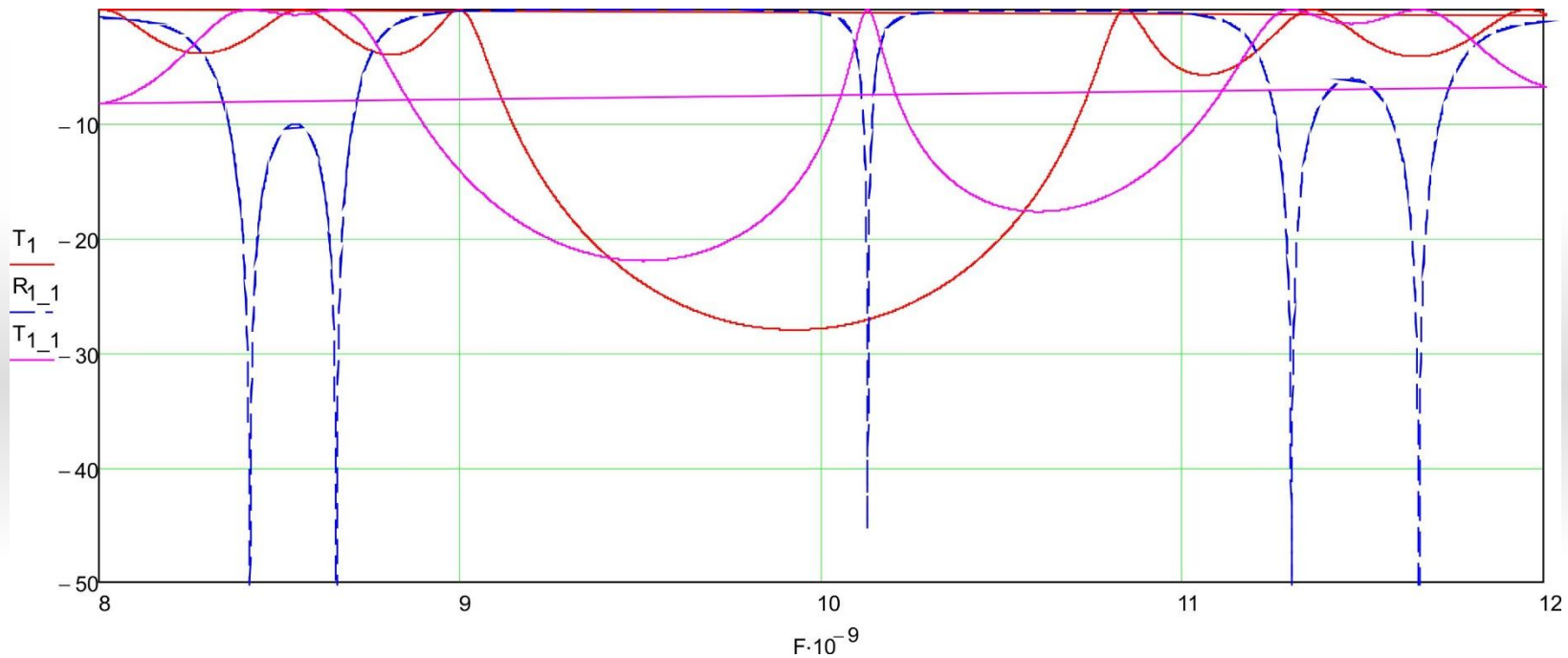
# Компьютерное моделирование характеристик фотонных кристаллов СВЧ-диапазона

Рассчитанная в квазистатическом приближении частотная зависимость коэффициента пропускания микрополосковой фотонной структуры, изображенной на рисунке, в диапазоне частот 0–20 GHz, представлена на рисунке (кривая 1), на этом же рисунке приведена частотная зависимость коэффициента пропускания фотонной структуры без нарушения периодичности (кривая 2).

Расчетные частотные зависимости коэффициента пропускания микрополосковой фотонной структуры с нарушением периодичности (кривая 1) и без нарушения (кривая 2).

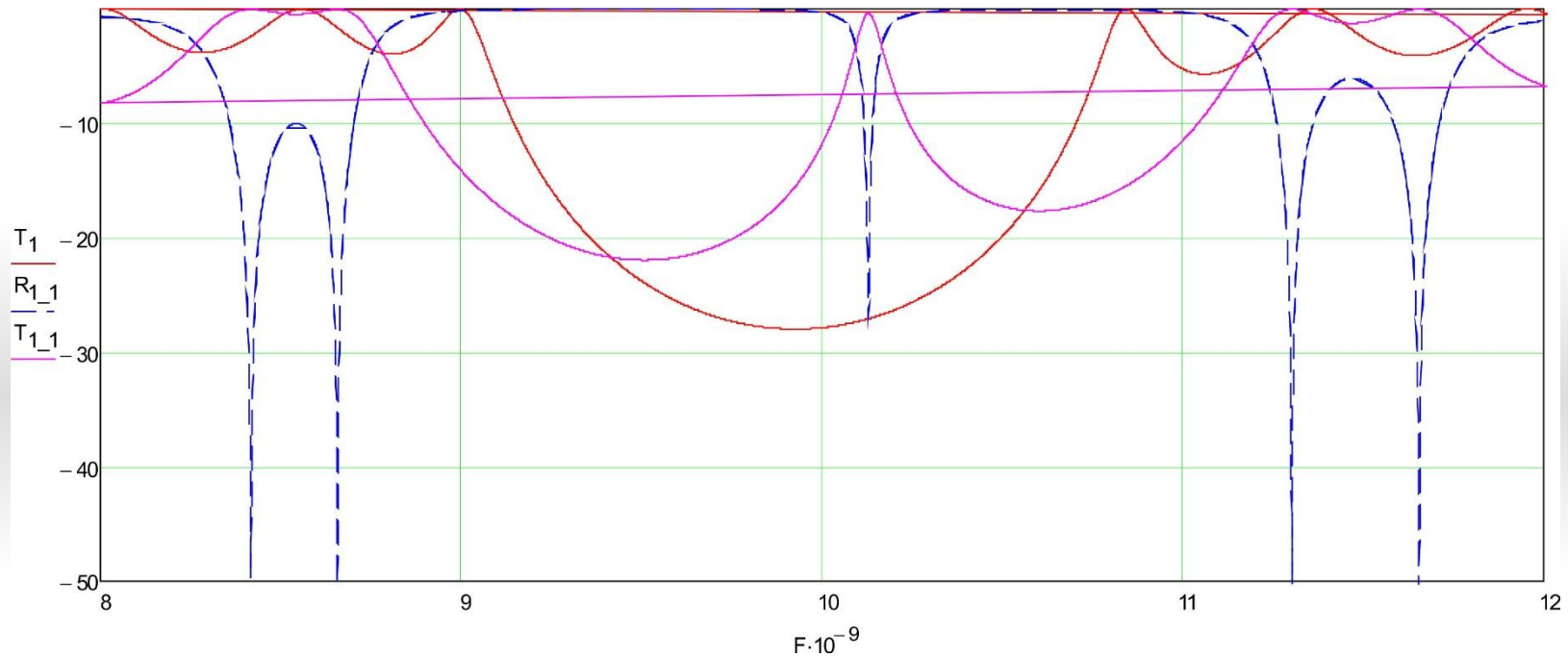


# Результаты компьютерного моделирования характеристик оптически управляемых элементов на основе фотонных кристаллов СВЧ-диапазона



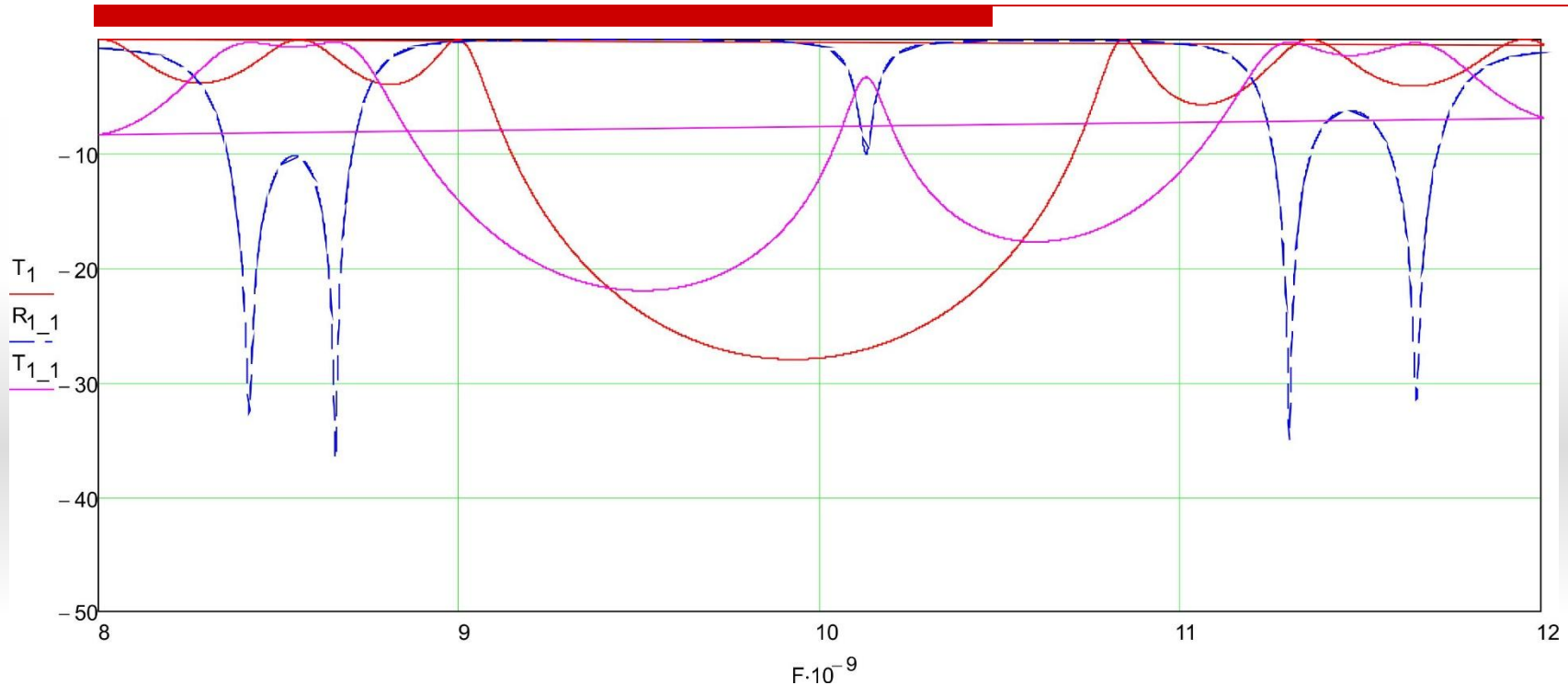
АЧХ фотонного кристалла без оптического сигнала

# Результаты компьютерного моделирования характеристик оптически управляемых элементов на основе фотонных кристаллов СВЧ-диапазона



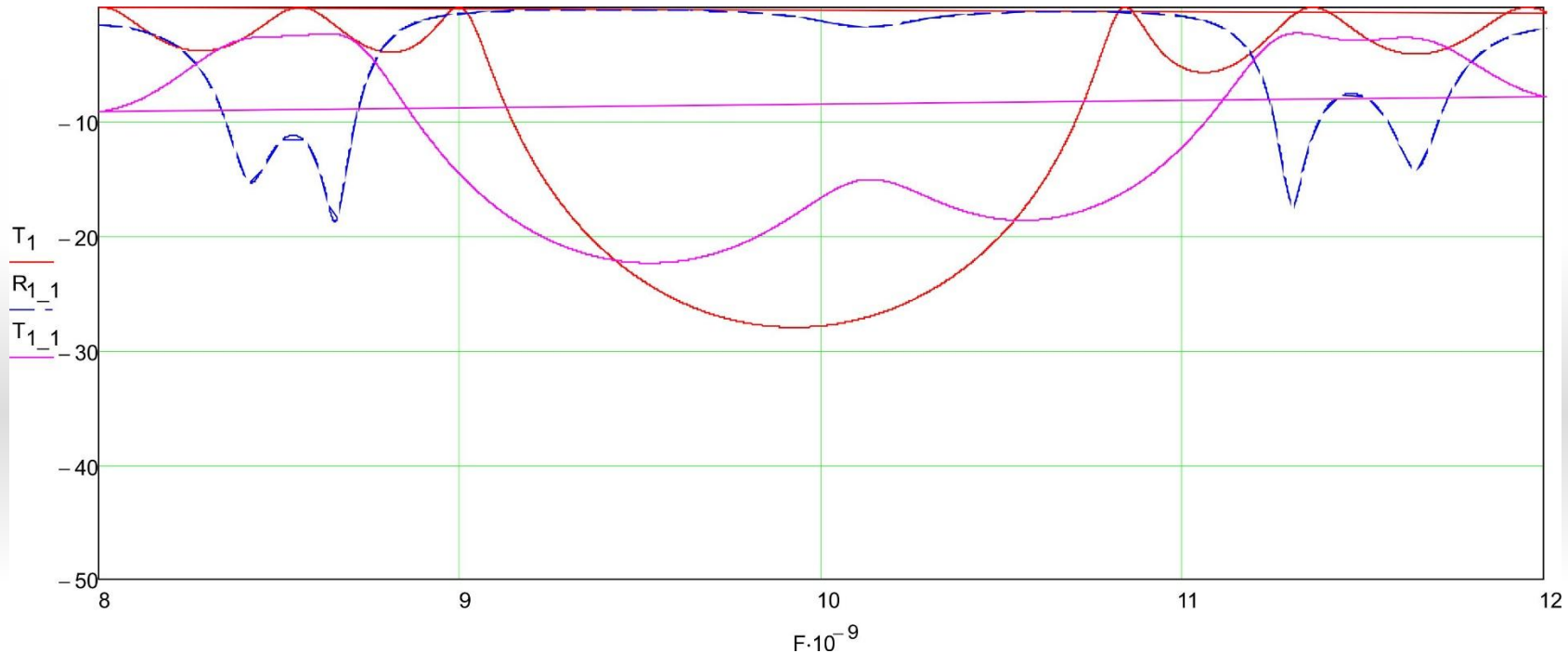
АЧХ фотонного кристалла при воздействии оптического сигнала  $\sigma=0.001$

# Результаты компьютерного моделирования характеристик оптически управляемых элементов на основе фотонных кристаллов СВЧ-диапазона



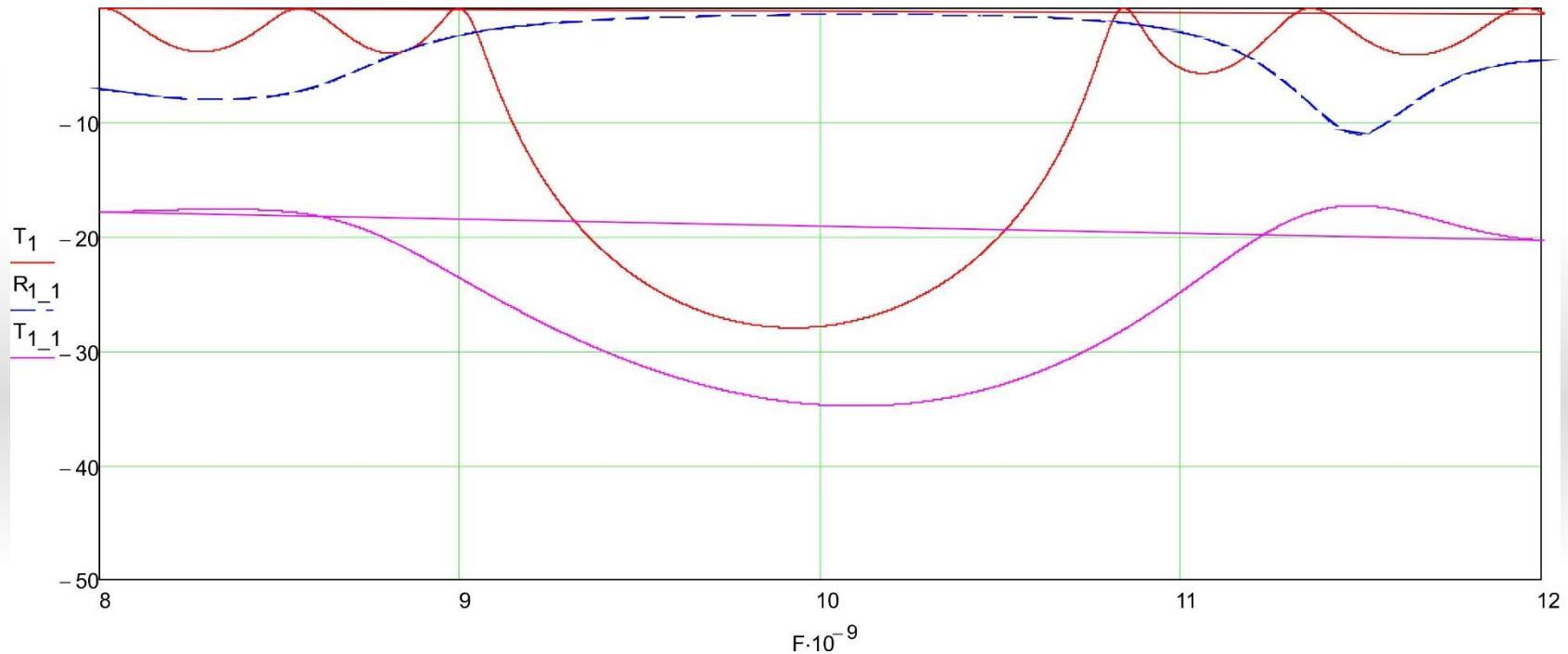
АЧХ фотонного кристалла при воздействии оптического сигнала  
 $\sigma=0.01$

# Результаты компьютерного моделирования характеристик оптически управляемых элементов на основе фотонных кристаллов СВЧ-диапазона



АЧХ фотонного кристалла при воздействии оптического сигнала  $\sigma=0.1$

# Результаты компьютерного моделирования характеристик оптически управляемых элементов на основе фотонных кристаллов СВЧ-диапазона



АЧХ фотонного кристалла при воздействии оптического сигнала  $\sigma=1.0$

# Выводы

---

- Описаны особенности взаимодействия электромагнитного излучения с фотонными кристаллами СВЧ-диапазона.
- Представлены результаты компьютерного моделирования оптически управляемых элементов на основе фотонных кристаллов СВЧ-диапазона

---

***Благодарю за внимание***



# Литература

---

- 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.
- 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. V. 49. N 2. P. 297–306.
- Usanov D.A., Skripal A.V., Abramov A.V., Bogolyubov A.S., Skvortsov V.S., Merdanov M.K. 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 37rd European Microwave Conference. Munich, Germany. 8–12th October 2007. P. 198–201.
- 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.
- Гуляев Ю.В., Никитов С.А. Фотонные и магнитофотонные кристаллы – новая среда для передачи информации// Радиотехника. 2003. №8. С. 26–30.
- Беляев Б.А., Волошин А.С., Шабанов В.Ф. Исследование микрополосковых аналогов полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51, №6. С. 694–701.

# Литература

---

- Чаплыгин Ю.А., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С. Методика измерения электропроводности нанометровых металлических пленок в слоистых структурах по спектрам отражения электромагнитного излучения// Известия вузов. Электроника. 2006. №6. С. 27–35.
- 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 36rd European Microwave Conference. Manchester, UK. 10–15th September 2006. 921–924.
- 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.
- Sato T., Buchner R. Dielectric relaxation processes in ethanol/water mixtures. J. Phys. Chem. A. 2004. Vol. 108. No. 23. P. 5007–5015.
- Saib A., Bednarz L., Daussin R., Bailly C., Lou X., Thomassin J.-M., Pagnouille C., Detrembleur C., Jerome R., Huynen I. Carbon Nanotube Composites for Broadband Microwave Absorbing Materials // IEEE Trans. on MTT. 2006. Vol. 54. N. 6. P. 2745-2754

# Литература

---

- De Rosa I. M., Dinescu A., Sarasini F., Sarto M. S., Tamburrano A. Effect of short carbon fibers and MWCNTs on microwave absorbing properties of polyester composites containing nickel-coated carbon fibers // Composites Science and Technology. 2010. V.70. P. 102–109.
- Наполнители для полимерных композиционных материалов. Спр. пособие // Под ред., Г.С. Каца и Д.В.Милевски.- М.: Химия, 1981, С. 736.