

**Физико-технологические основы
энергонезависимых элементов памяти с
совмещением в одном чипе
многофункциональных устройств на
принципах сегнетоэлектричества и
спинтроники для нейроморфных систем**

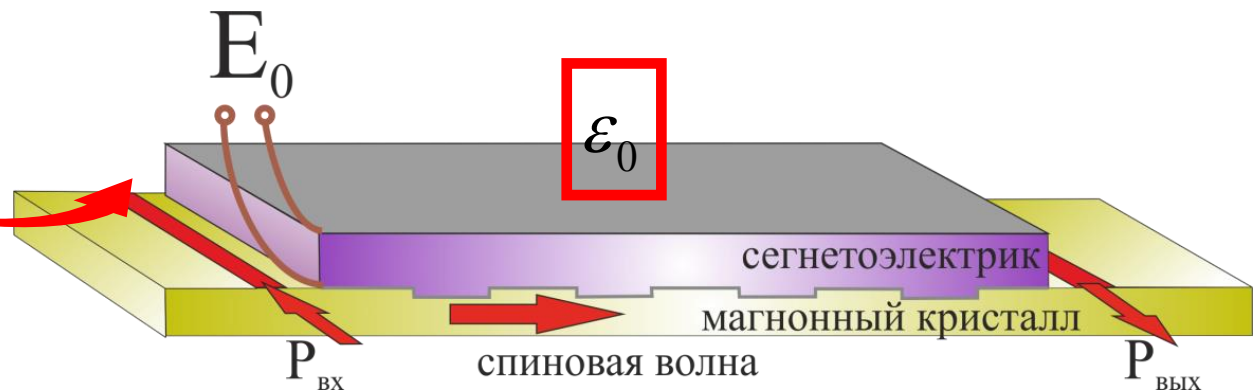
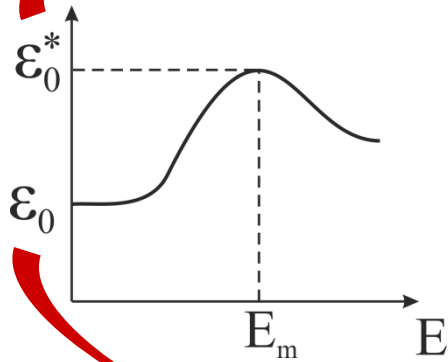
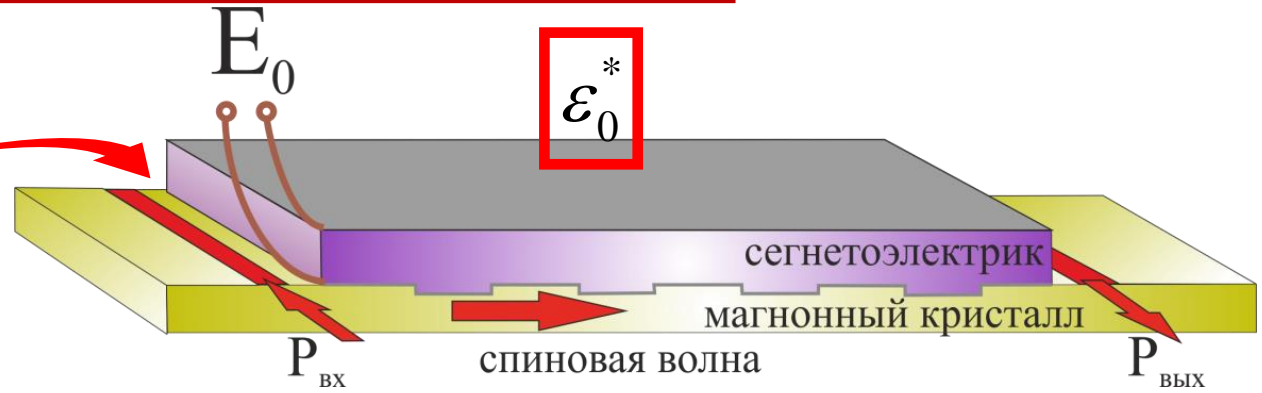
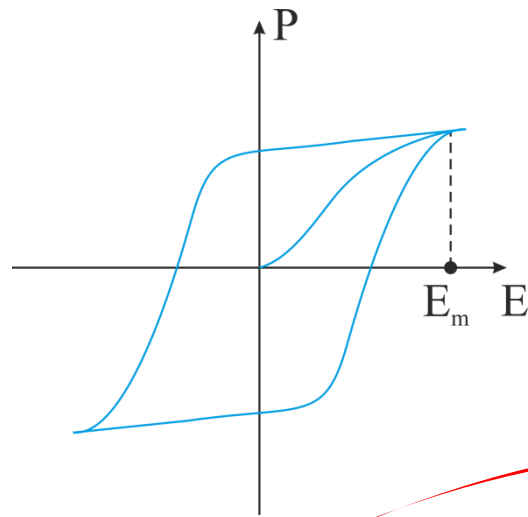
к.ф.-м.н. Морозова Мария Александровна

Московский физико-технический институт,
Физтех-школа электроники, фотоники и молекулярной физики
Лаборатория терагерцовой спинтроники

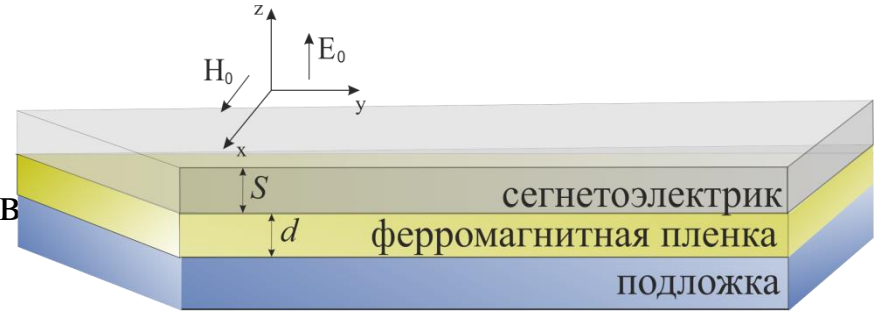
Типы сегнетоэлектрической памяти

| | Схема ячейки | Принцип работы | Ресурс, циклы | Энергопотребление | Время записи | Разработка/Производство |
|-------|--------------|---|---------------|-------------------|--------------|--|
| FeRAM | 1Т-1С | Увеличение тока при пропускании через СЭ в зависимости от поляризации | 10^{14} | <0.1 пДж | 10 нс | Ramtron (США) |
| FeFET | 1Т | Изменение напряжения открытия транзистора при поляризации СЭ | 10^9 | <0.1 пДж | 10 нс | The Ferroelectric Memory Company; TUD;IPMS (Германия), Токуо Tech (Япония) |
| FTJ | 1С | Наличие квантового туннелирования при поляризации СЭ | 10^6 | <0.1 пДж | 20 нс | CNRS (Франция), МФТИ |

Мультиферроидный спинволновой мемристор (МСМ) на основе структуры магнонный кристалл – сегнетоэлектрик (МК-СЭ)



Структура ФП-СЭ



Дисперсионное соотношение для ГЭМСВ в ФП-СЭ:

$$\Omega_0^H = \Omega_0^S \Omega_0^E - \theta = 0$$

Дисперсионное соотношение для МСВ в ФП:

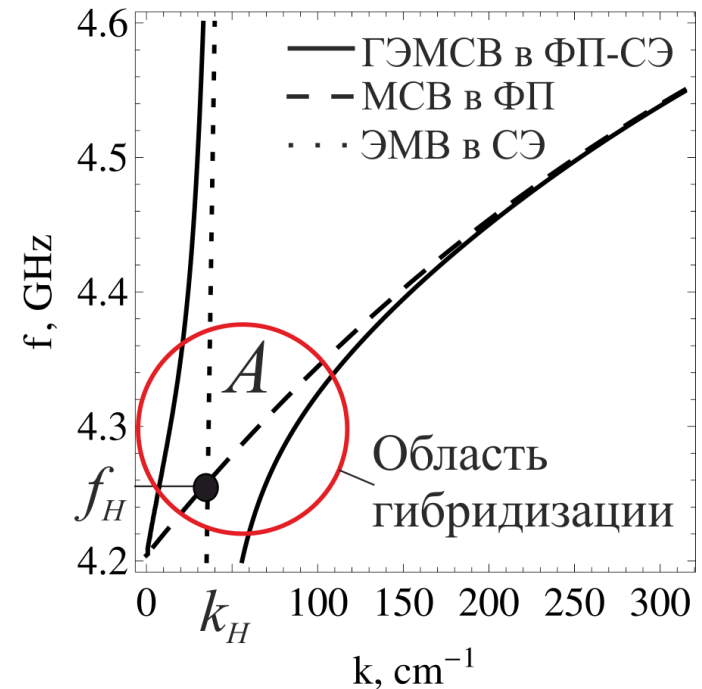
$$\Omega_0^S = 0, \text{ где } \Omega_0^S = \omega^2 - \omega_{\perp}^2 - \frac{\omega_M^2 k_0 d}{4},$$

Дисперсионное соотношение для первой моды ЭМВ в диэлектрике:

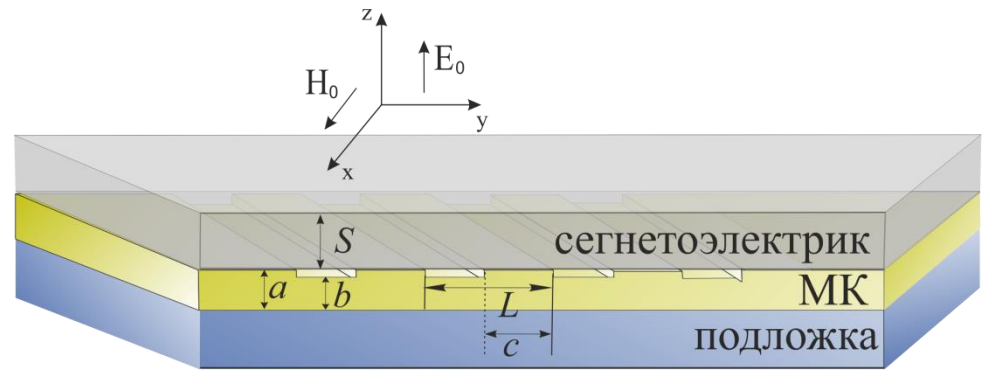
$$\Omega_0^E = 0, \text{ где } \Omega_0^E = \omega^2 - c^2 \frac{2k_0}{\varepsilon S}$$

коэффициент связи между МСВ в ФП и ЭМВ в СЭ:

$$\theta = \frac{\varepsilon \omega^2 \omega_M \left(\omega + \omega_H + \frac{\omega_M}{2} \right) (1 - e^{-2k_0 d})}{2k_0^2 c^2}$$



Структура МК-СЭ



$$\Omega_0^H = 0$$

$$\rightarrow \omega \rightarrow j \frac{\partial}{\partial t}, k_0 \rightarrow -j \frac{\partial}{\partial y}$$



$$-\frac{2c^2}{\varepsilon S} \frac{\partial^4 \varphi}{\partial t^2 \partial y^2} + j \frac{\partial^5 \varphi}{\partial t^4 \partial y} - \frac{2c^2 \omega_{\perp}^2}{\varepsilon S} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} +$$

$$+ j \omega_{\perp}^2 \frac{\partial^3 \varphi}{\partial t^2 \partial y} - d \left(j \frac{c^2 k_0^2 \omega_M^2}{\varepsilon S} \frac{\partial^3 \varphi}{\partial y^3} +$$

$$+ \frac{\omega_M^2}{2} \frac{\partial^4 \varphi}{\partial t^2 \partial y^2} \right) - d \frac{\exp(-2k_0 D) \varepsilon}{c^2} \times$$

$$\left(j \omega_M \frac{\partial^3}{\partial t^3} - \left(\omega_H \omega_M + \frac{\omega_M^2}{2} \right) \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \varphi = 0$$

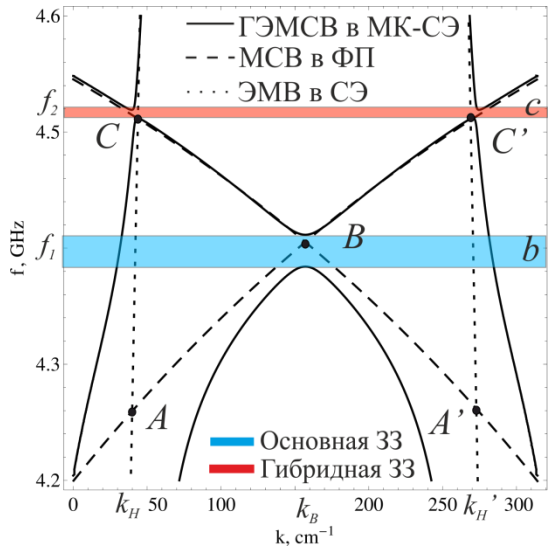
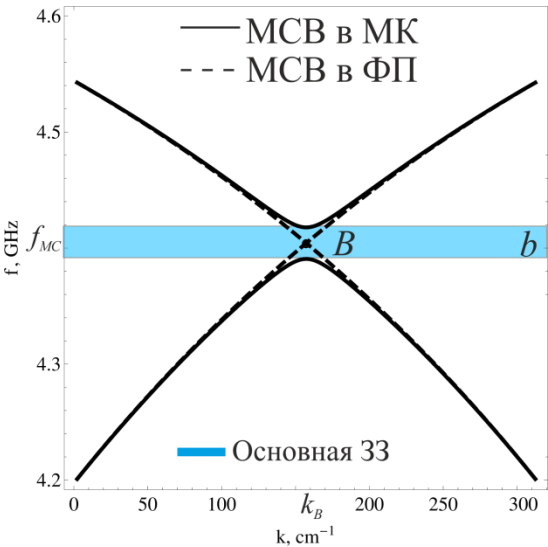
$$\varphi = A \exp[j(\omega t - k_0 y)] + B \exp[j(\omega t + k_{-1} y)]$$

$$\rightarrow d = d_0 \left(1 + \delta d \cos\left(\frac{2\pi}{L} y\right) \right)$$

$$\begin{vmatrix} \Omega_0^H & \beta_0^H \\ \beta_{-1}^H & \Omega_{-1}^H \end{vmatrix} = 0$$

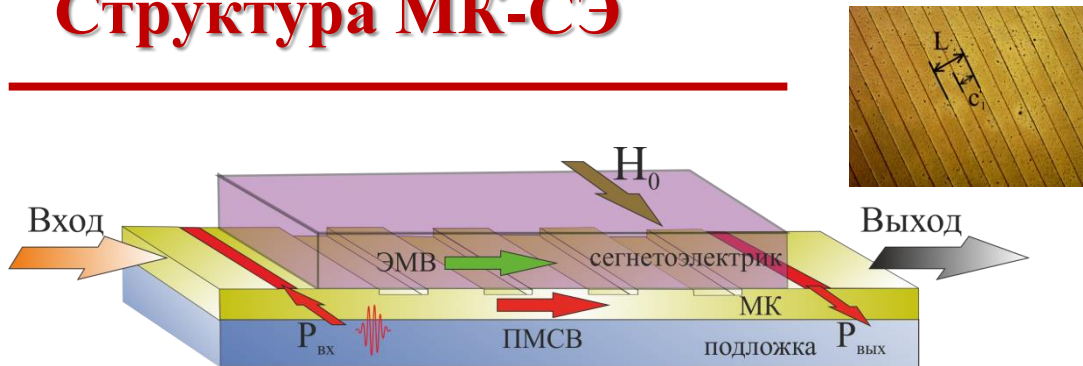
$\beta_{0,-1}^H \propto \delta d$ - коэффициент связи прямых и встречных волн

Формируется дополнительная гибридная запрещенная зона за счёт взаимодействия ЭМВ и отраженной МСВ.



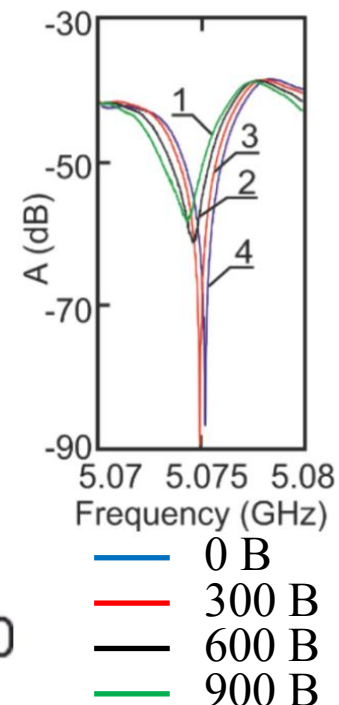
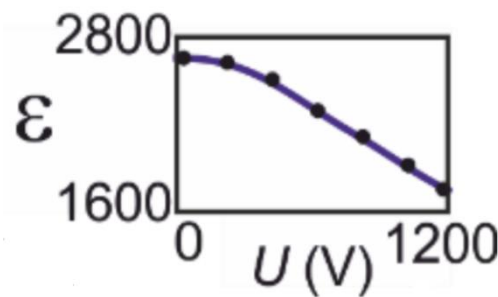
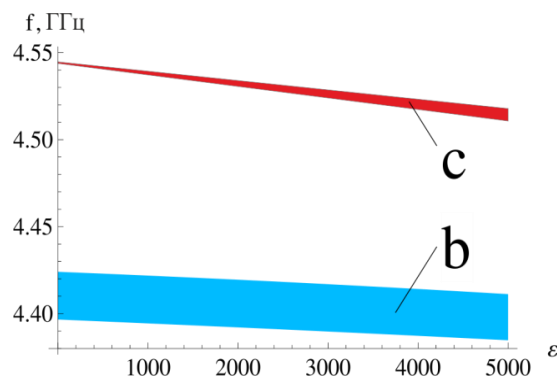
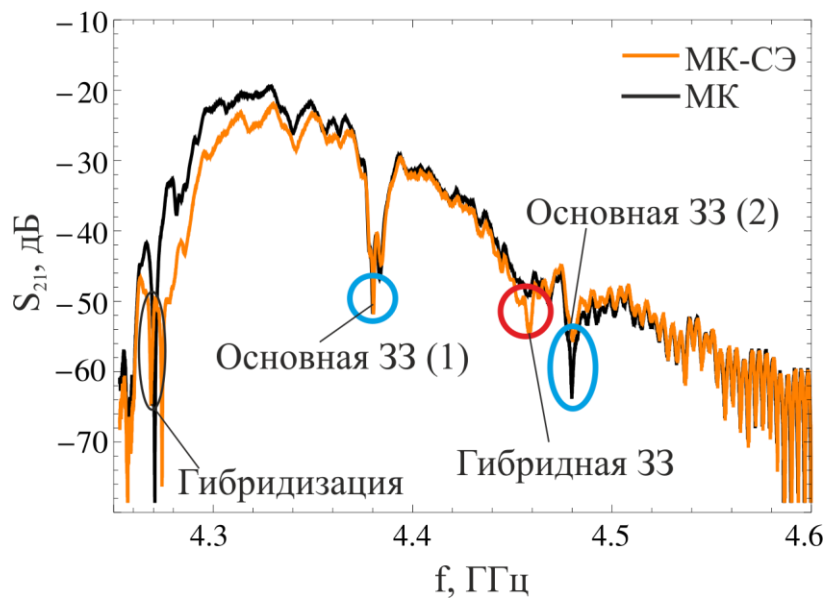
Morozova M.A. et al. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015. Vol. 51, №11, p. 2802504.
Grishin S.V. et al. *IEEE Trans. on Magnetics*. 2014. Vol. 50, No. 11. P. 4006204.

Структура МК-СЭ



Параметры структуры

Сегнетоэлектрик: пластина БСТ,
 $D = 500$ мкм - толщина,
 $w = 2$ мм - ширина, $l = 5$ мм - длина,
 $\epsilon = 4000$ - диэлектрическая проницаемость



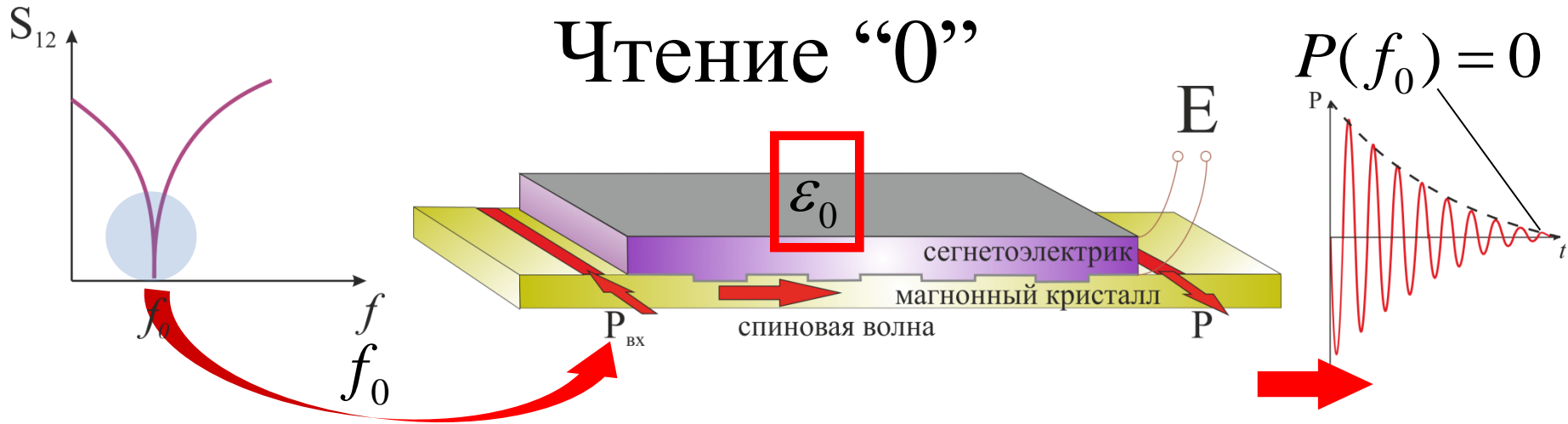
Наложение на МК слоя БСТ приводит к появлению дополнительной гибридной запрещенной зоны.

Морозова М.А. и др. Радиотехника и электроника. 2014. №5.с. 510-516.

Grishin S. V. et al. J. Appl. Phys. 2014. Vol. 115, 053908.

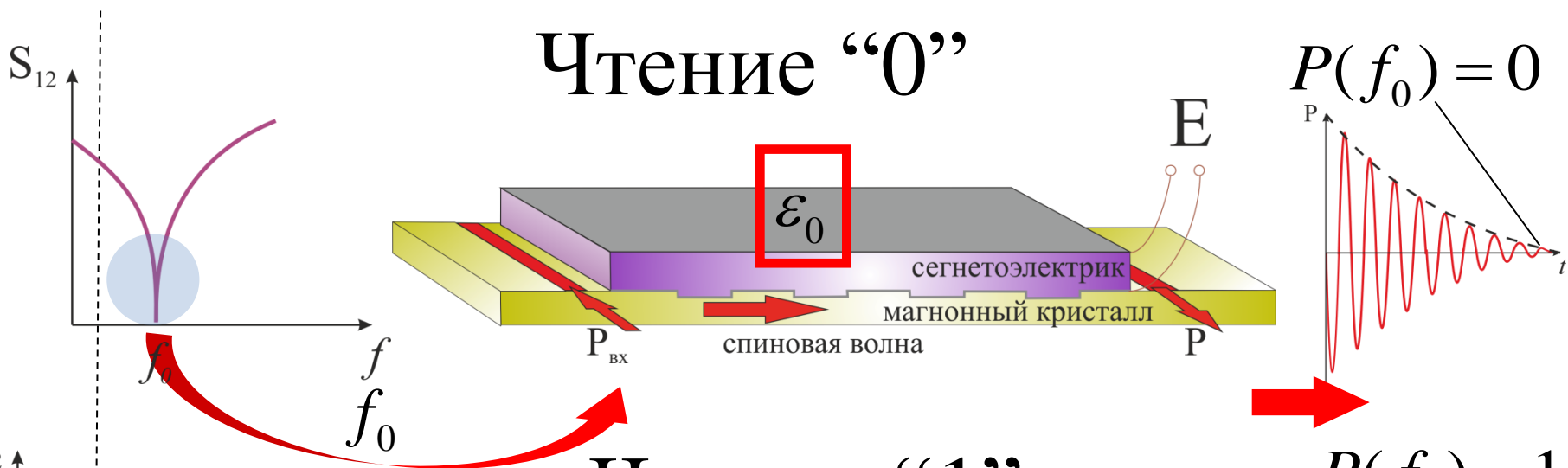
МСМ на основе МК-СЭ

Чтение "0"



МСМ на основе МК-СЭ

Чтение "0"

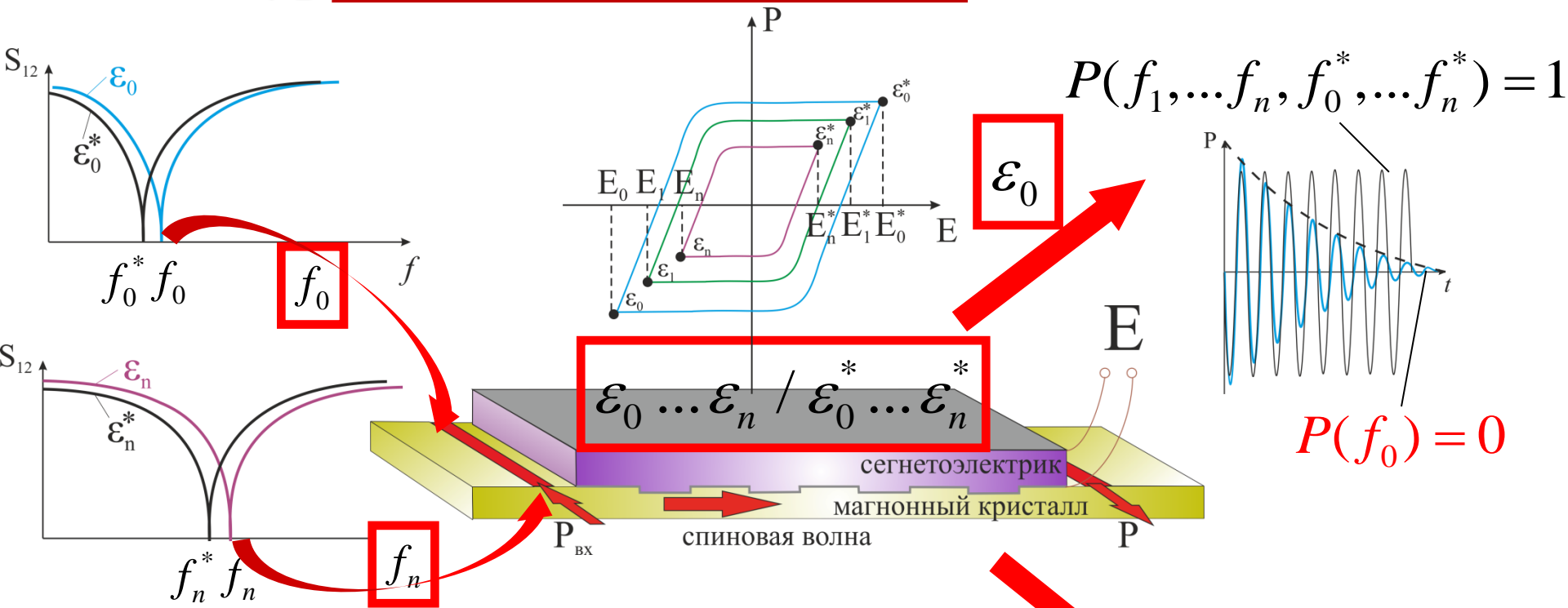


Чтение "1"



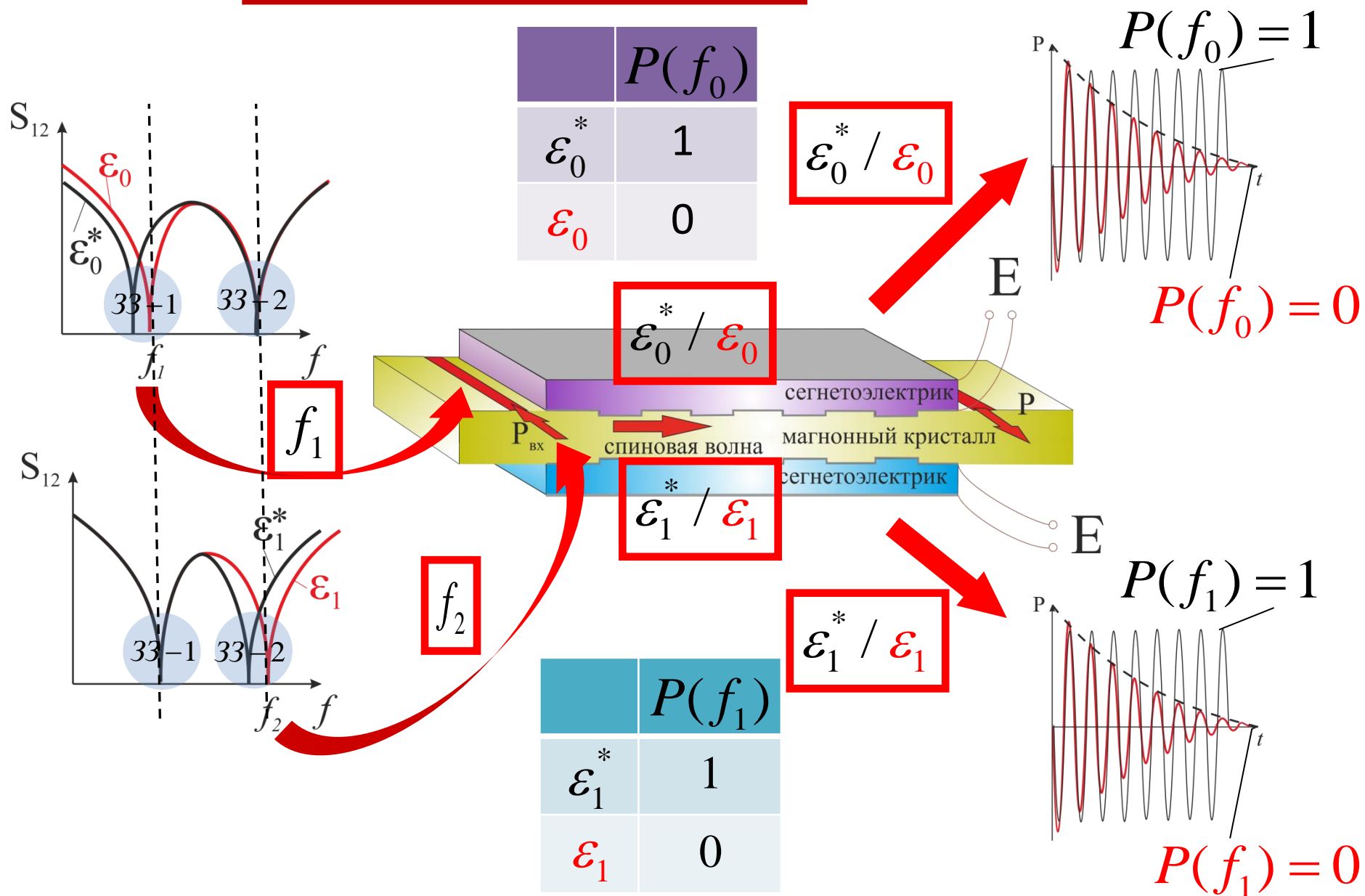
| | $P(f_0)$ |
|----------------|----------|
| ϵ_0^* | 1 |
| ϵ_0 | 0 |

n-уровневый МСМ на основе МК-СЭ



| | $P(f_0)$ | $P(f_1)$ | $P(f_n)$ | $P(f_0^*)$ | $P(f_1^*)$ | $P(f_n^*)$ |
|----------------|----------|----------|----------|------------|------------|------------|
| ϵ_0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| ϵ_1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| ϵ_n | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| ϵ_0^* | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| ϵ_1^* | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| ϵ_n^* | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |

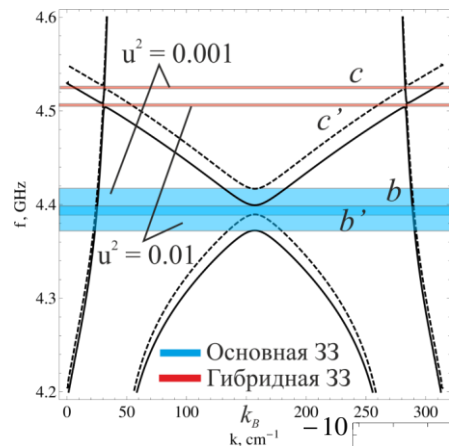
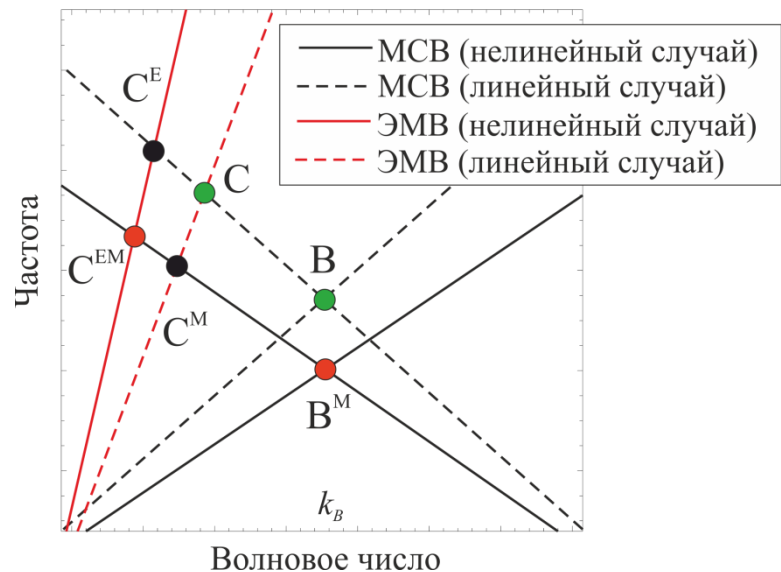
МСМ на основе СЭ-МК-СЭ



Структура МК-СЭ. Нелинейность

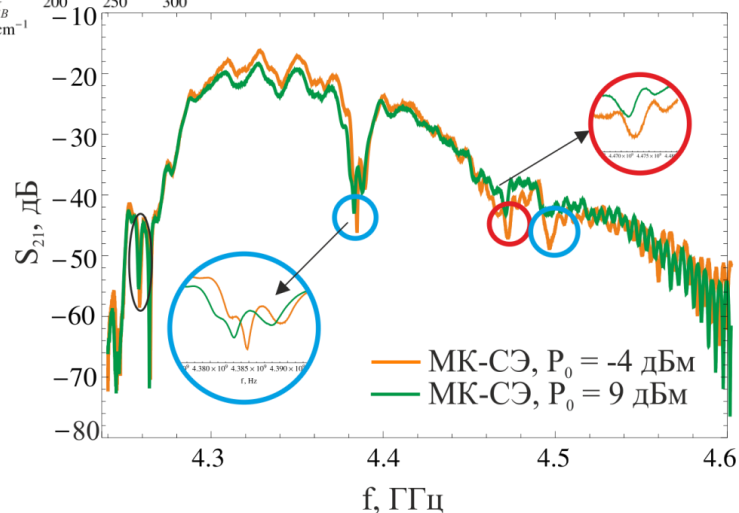
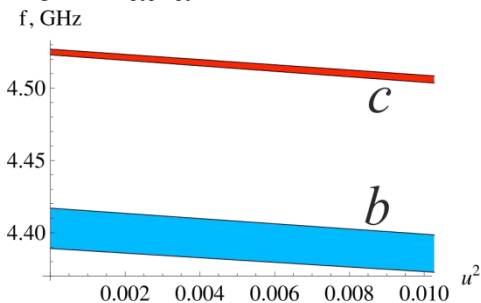
$M_z = M_0(1 - q|u|^2)$ - Магнитная нелинейность q, N - Коэффициенты нелинейности

$\epsilon_f = \epsilon_0 - N|E|^2$ - Электрическая нелинейность



Зависимость от амплитуды входного сигнала

сигнала



Учет магнитной нелинейности приводит к сдвигу обеих запрещенных зон вниз по частоте, учет электрической – к сдвигу гибридной запрещенной зоны вверх по частоте.

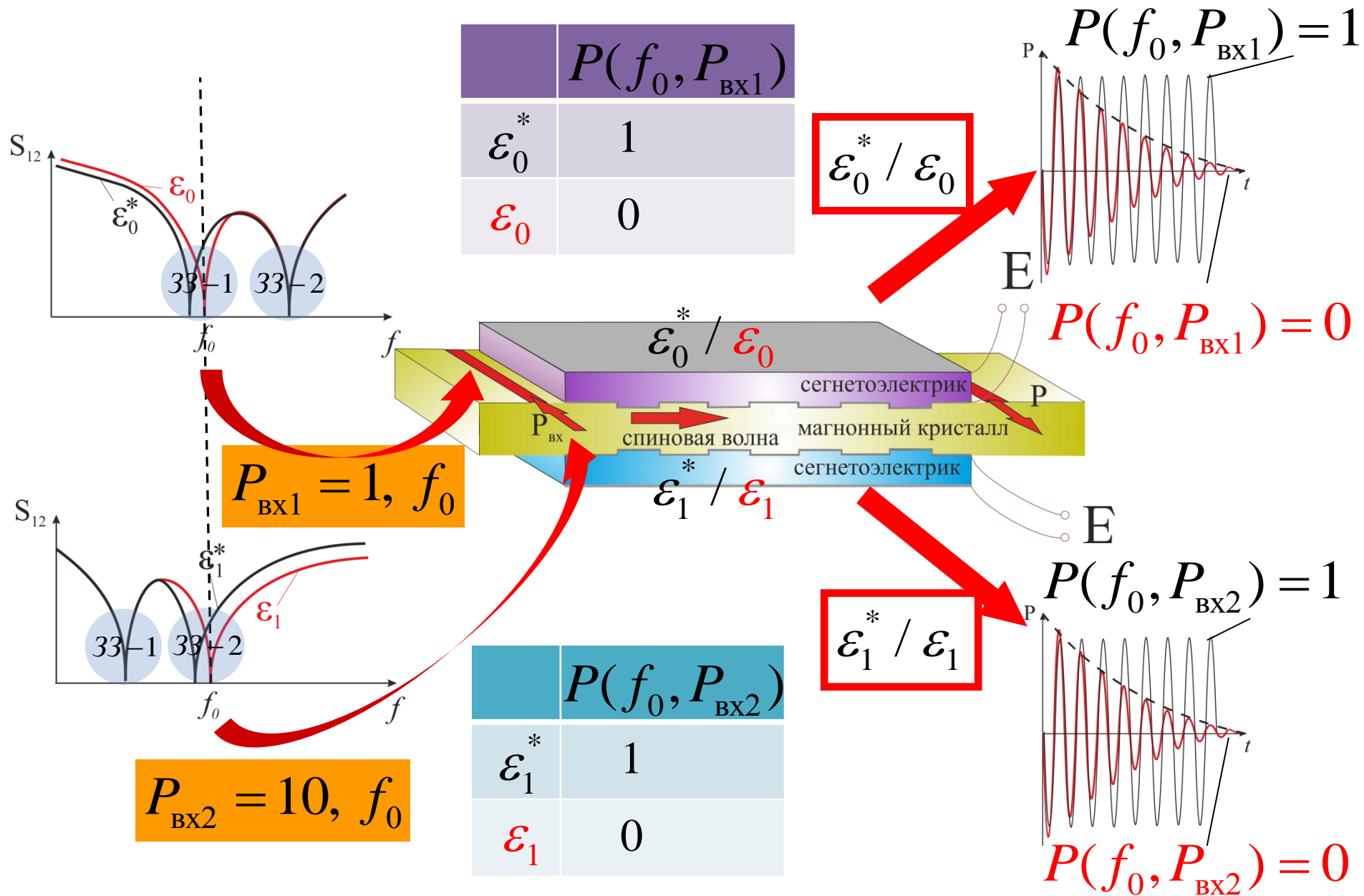
Увеличение мощности входного сигнала приводит к сдвигу запрещенных зон вниз по частоте.

Morozova M. A. et al. *Applied physics letters*. 2015. Vol. 107. P. 242402.

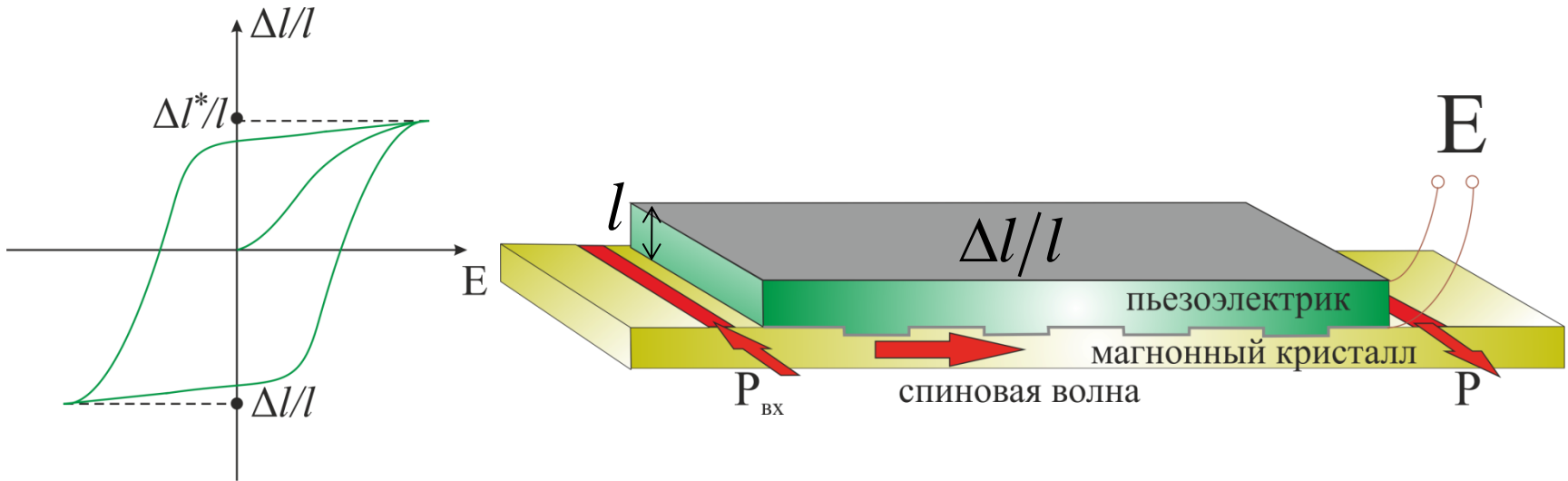
Шараевский Ю.П., Морозова М.А., Гришин С.В. *Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот*. М.: Физматлит. 2009. Гл. 11. С. 348-379.

Sadovnikov A. V. et al. *Appl. Phys. Lett.* 2016. Vol. 109. P. 042407.

Нелинейный МСМ на основе СЭ-МК-СЭ



МСМ на основе МК-ПЭ



Структура МК-ПЭ

$$\frac{\partial^2 m}{\partial t^2} + \omega_H(x)(\omega_H(x) + \omega_M(x))m \pm j \frac{\omega_M^2 d(x)}{2} \frac{\partial}{\partial x} m = 0$$

$$d = d_0 \left(1 + \delta d \cos\left(\frac{2\pi}{L}x\right) \right), \quad H = H_0 \left(1 + \delta H \cos\left(\frac{2\pi}{L}x\right) \right),$$

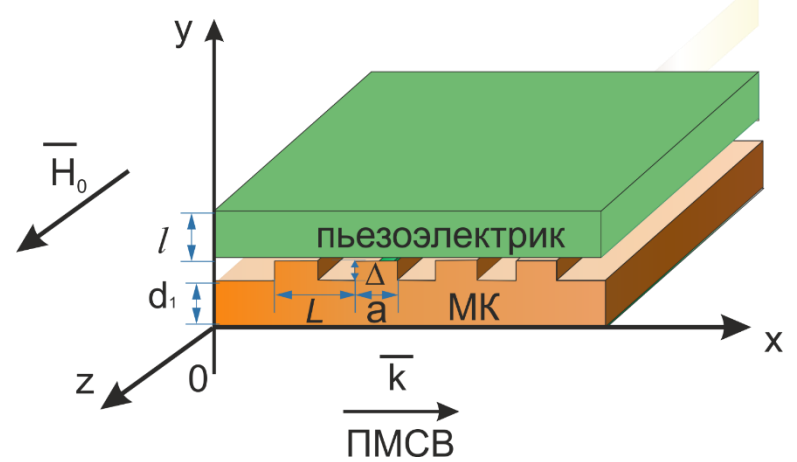
$$D_0 D_{-1} = (\kappa_{+\delta d} + s\kappa_{\delta H})(\kappa_{-\delta d} + s\kappa_{\delta H})$$

$D_0 = -\omega^2 + \omega_{\perp}^2 + \frac{\omega_M^2 k_0 d_0}{2}$ - дисперсионные соотношения,
описывающие прямую

$D_{-1} = -\omega^2 + \omega_{\perp}^2 + \frac{\omega_M^2 k_{-1} d_0}{2}$ и встречную МСВ,

$\kappa_{\pm\delta d} = \frac{\omega_M^2}{2} d_0 k_{\mp} \delta d$ - коэффициенты связи между прямой
и отраженной волной за счёт

$\kappa_{\delta H} = \omega_M \omega_H \delta H$ и отраженной волной за счёт.



Параметры структуры

Пьезоэлектрик: пластина PZT

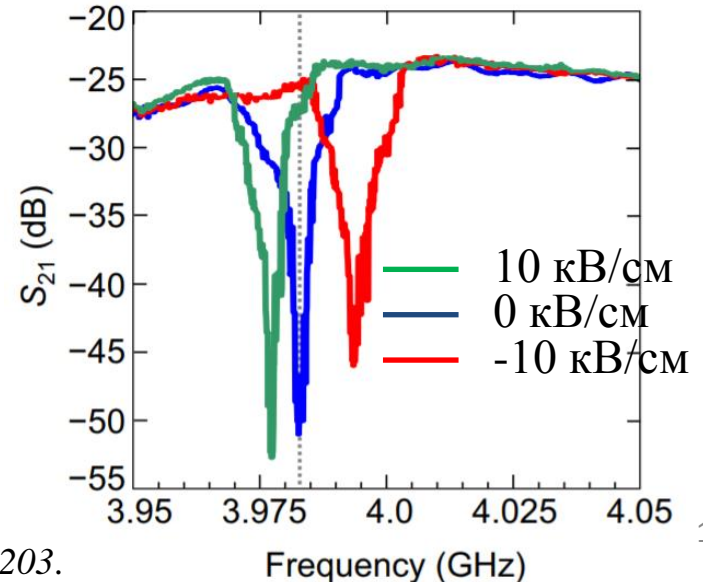
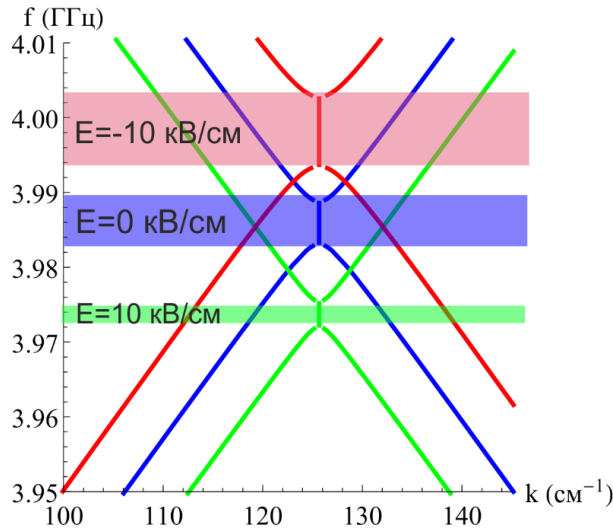
$l = 250$ мкм, $w = 2$ мм - ширина, $l = 5$ мм - длина,

МК: ЖИГ

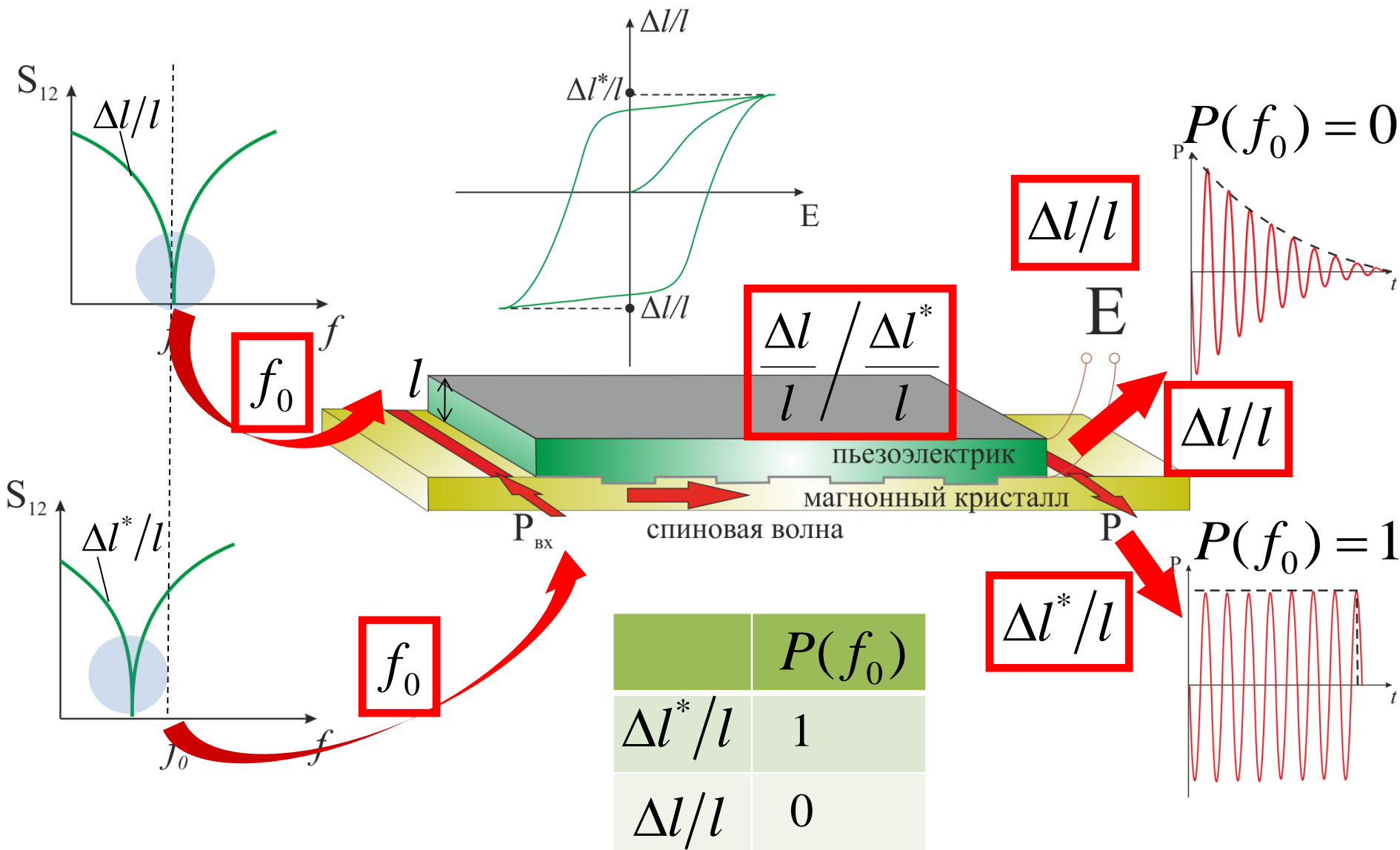
$d_1 = 10$ мкм

$d_1 = 10$ мкм

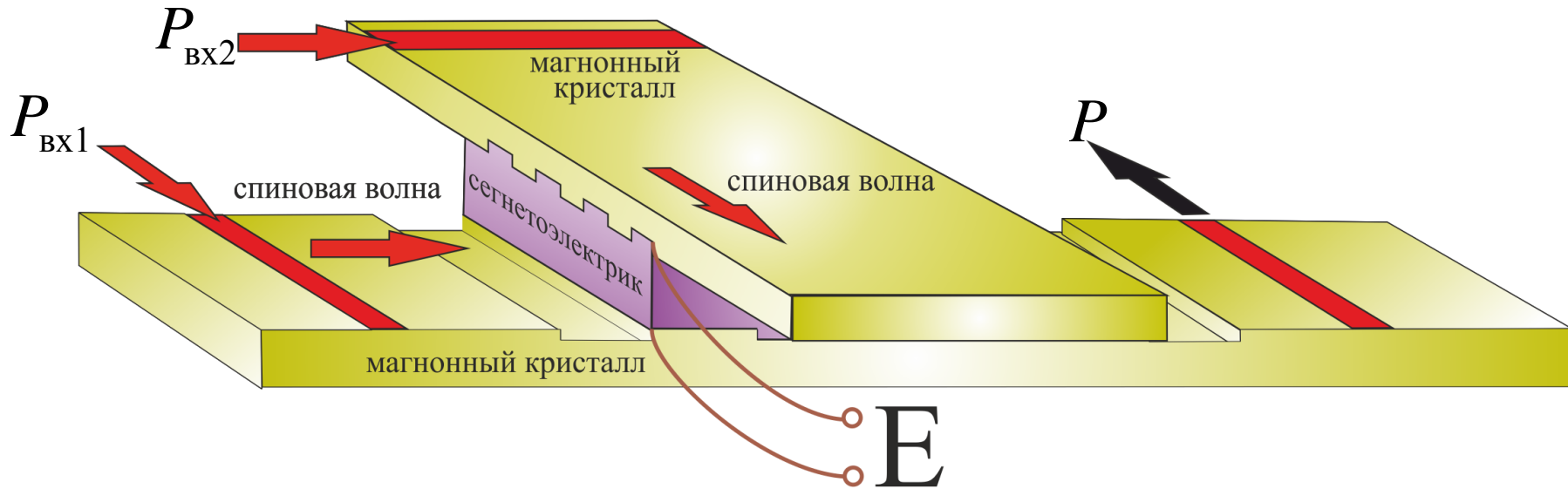
При приложении
напряжения
положительной
полярности
(отрицательной) к
слою ПЭ
запрещенная зона
сдвигается вниз
(вверх) по частоте.



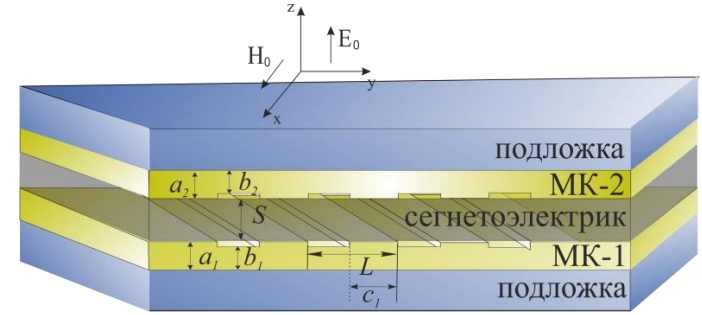
МСМ на основе МК-ПЭ



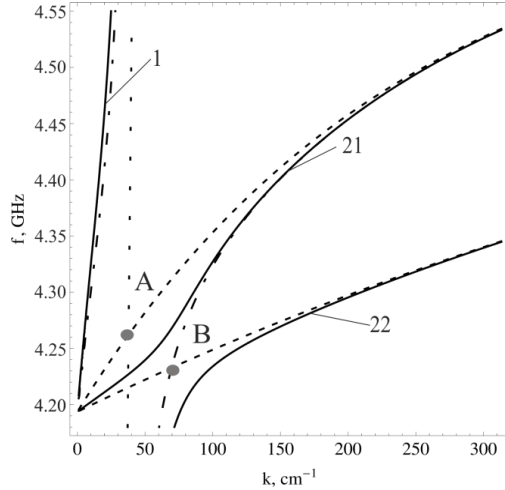
МСМ на основе МК-СЭ-МК (логический элемент)



Структура МК-СЭ-МК

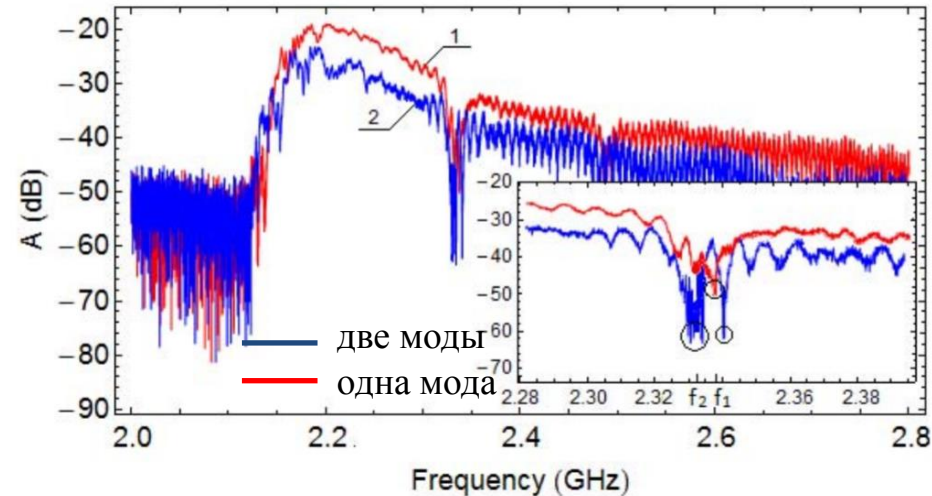
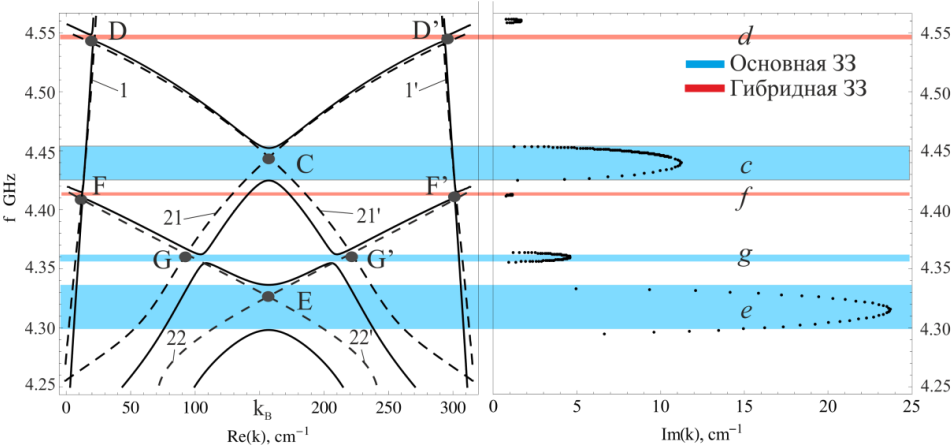
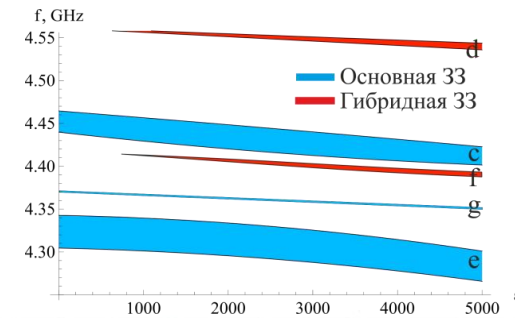


Структура ФП-СЭ-ФП



Основные зоны обусловлены взаимодействием прямых и отраженных МСВ. Гибридные - взаимодействием отраженных МСВ и ЭМВ.

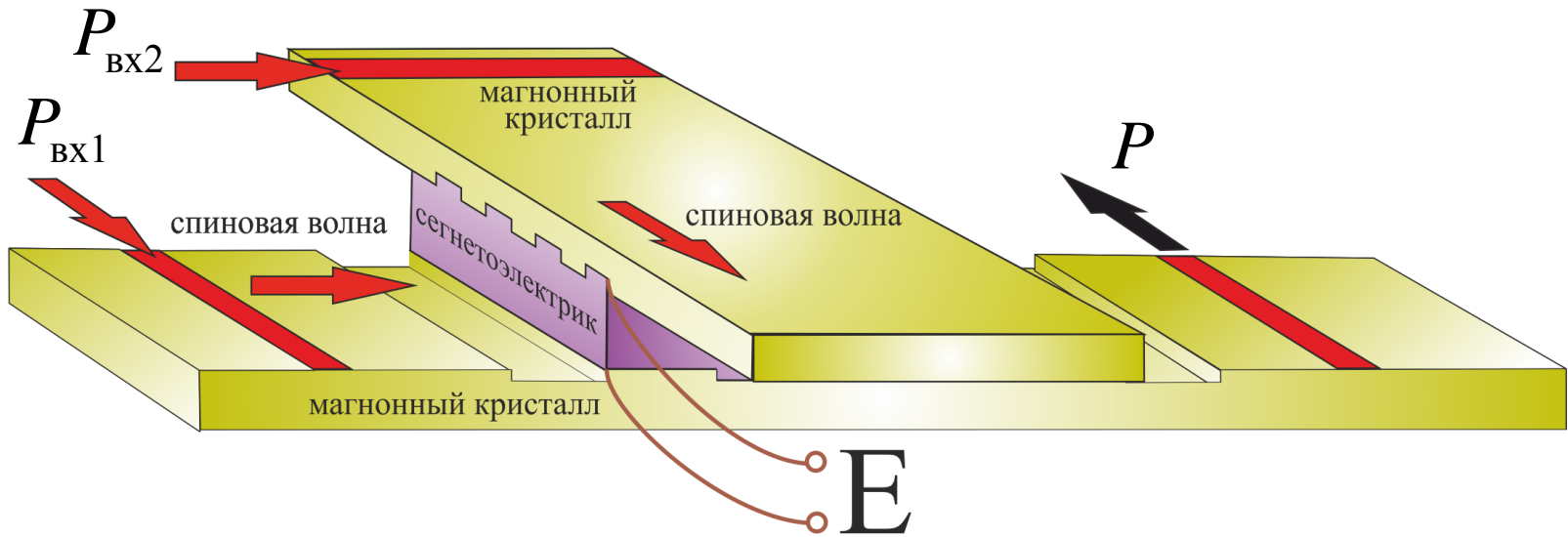
Зависимость от диэлектрической проницаемости СЭ



Пять запрещенных зон (3 основных и 2 гибридных)

Морозова М.А. и др. *Физика твердого тела*. 2016. Т. 58, вып. 2. С.266-272.
 Никитов С.А. и др. *УФН*. 2015. Т. 185 1099–1128.
 Morozova M.A. et al. *Journal of Applied Physics*. 2016. V. 120, № 22. P. 223901.

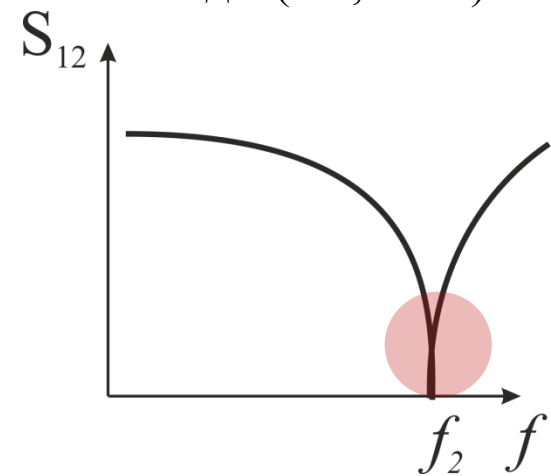
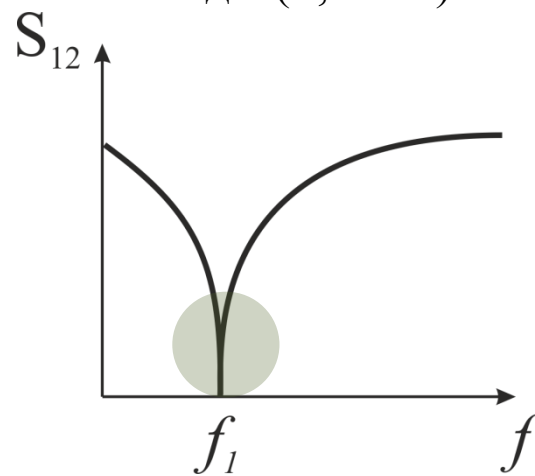
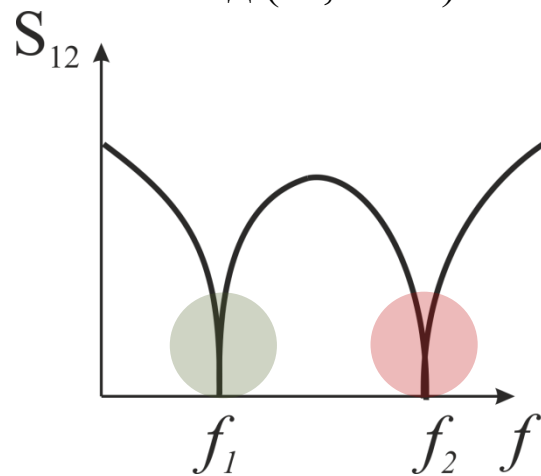
МСМ на основе МК-СЭ-МК (логический элемент)



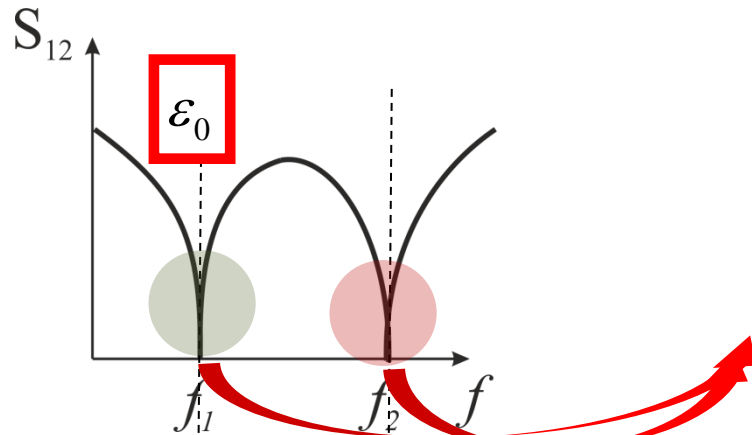
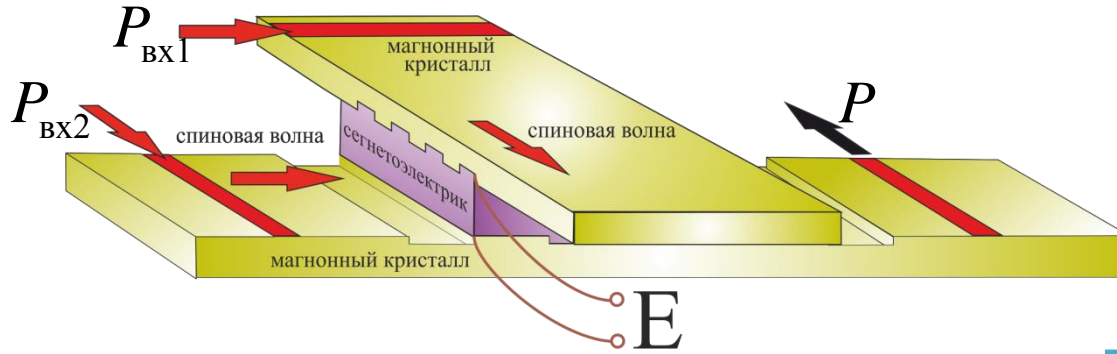
Возбуждение обеих мод (M, «00»)

Возбуждение симметричной моды (S, «01»)

Возбуждение антисимметричной моды (AS, «10»)

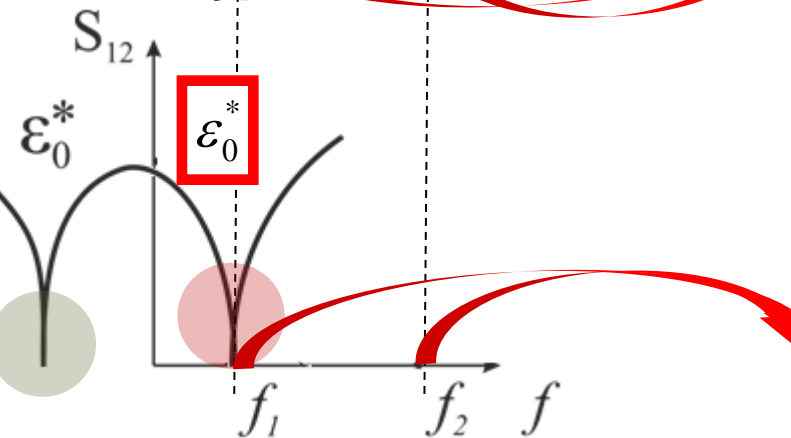


МСМ на основе МК-СЭ-МК (логический элемент)



ИЛИ ($X \vee Y$)

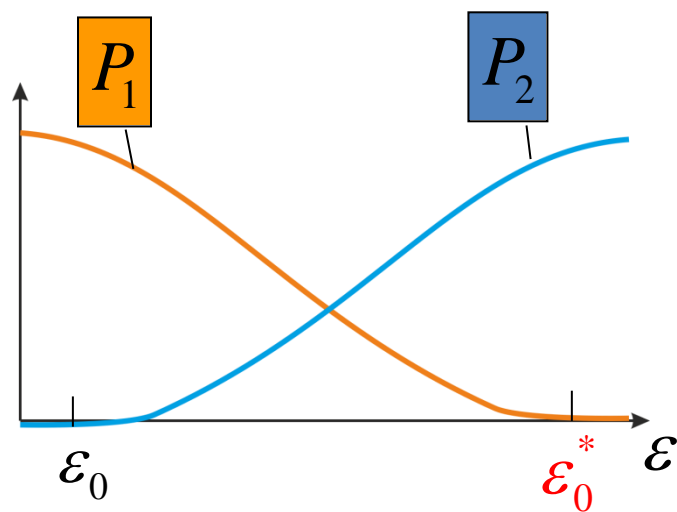
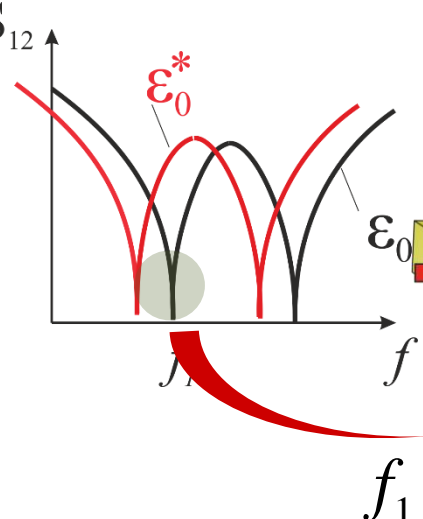
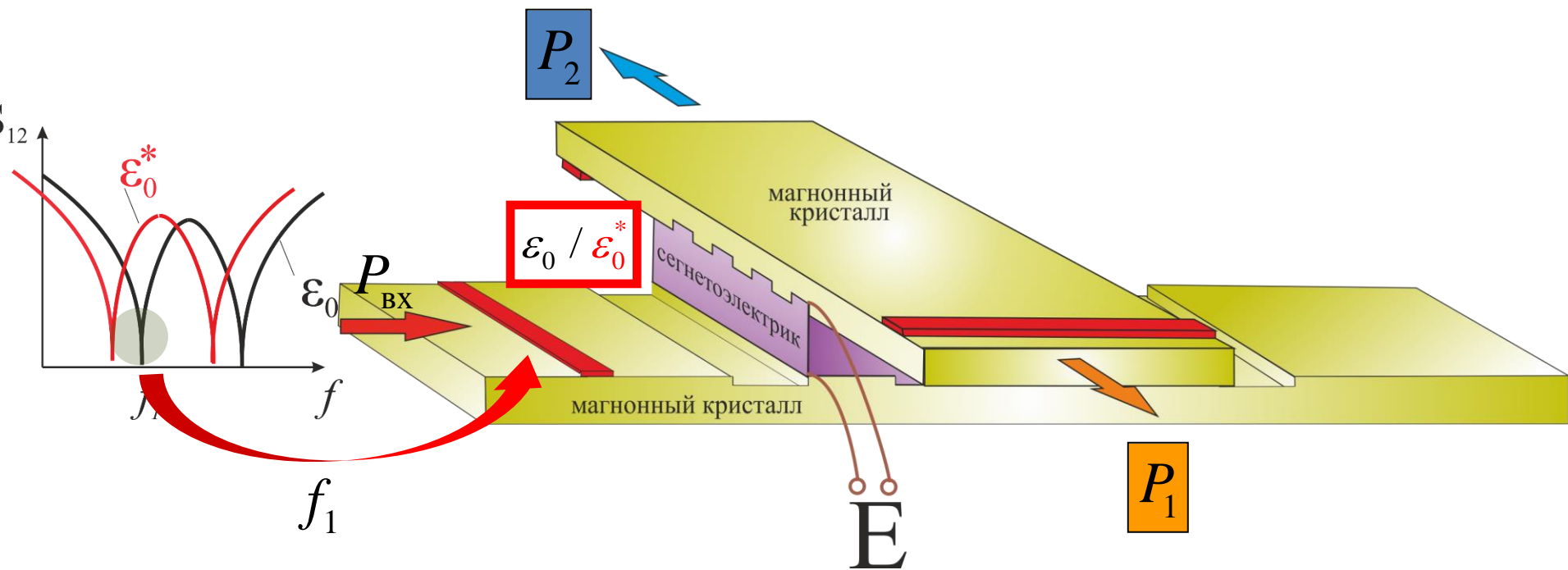
| | | $P(f_1, f_2)$ |
|----|----|---------------|
| M | 00 | 0 |
| S | 01 | 1 |
| AS | 10 | 1 |
| - | 11 | 1 |



Повторение Y

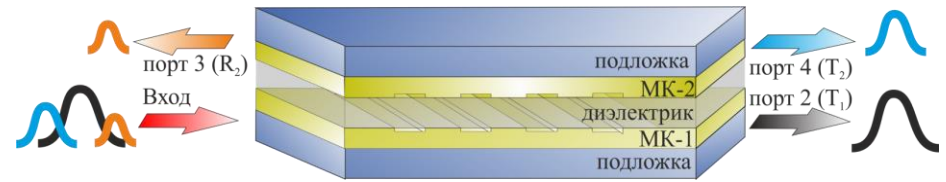
| | | $P(f_1, f_2)$ |
|----|----|---------------|
| M | 00 | 0 |
| S | 01 | 1 |
| AS | 10 | 0 |
| - | 11 | 1 |

МСМ на основе МК-СЭ-МК (разделение по портам)



| | P_1 | P_2 |
|----------------|-------|-------|
| ϵ_0 | 1 | 0 |
| ϵ_0^* | 0 | 1 |

Структура МК-МК. Нелинейность

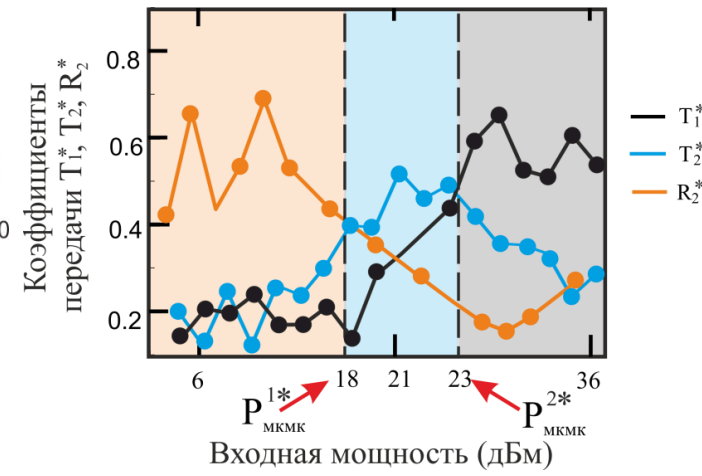
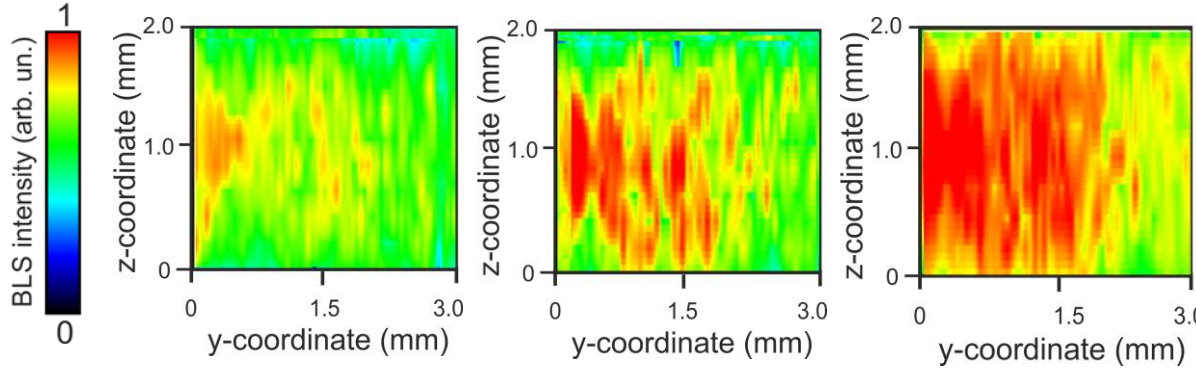


МК 2

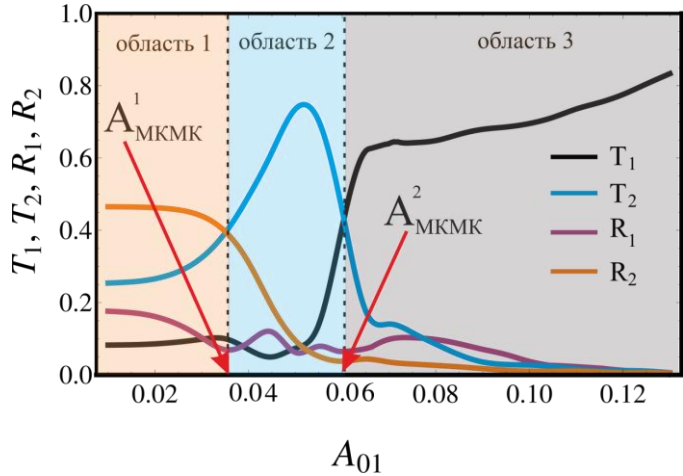
P=6 dBm

P=20 dBm

P=36 dBm



$$\begin{cases} j \left(\frac{\partial A_{1,2}}{\partial t} + V \frac{\partial A_{1,2}}{\partial y} \right) + \eta A_{1,2} + \chi A_{2,1} + \kappa B_{1,2} + \sigma B_{2,1} + \gamma (|A_{1,2}|^2 + 2|B_{1,2}|^2) A_{1,2} = 0; \\ j \left(\frac{\partial B_{1,2}}{\partial t} - V \frac{\partial B_{1,2}}{\partial y} \right) + \eta B_{1,2} + \chi B_{2,1} + \kappa A_{1,2} + \sigma A_{2,1} + \gamma (|B_{1,2}|^2 + 2|A_{1,2}|^2) B_{1,2} = 0, \end{cases}$$



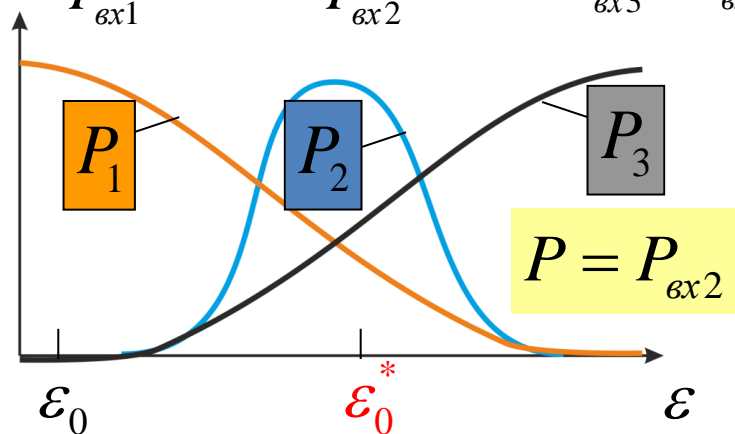
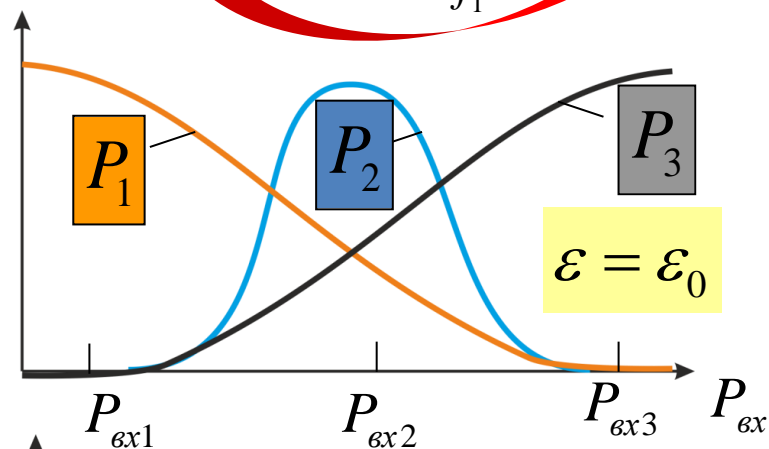
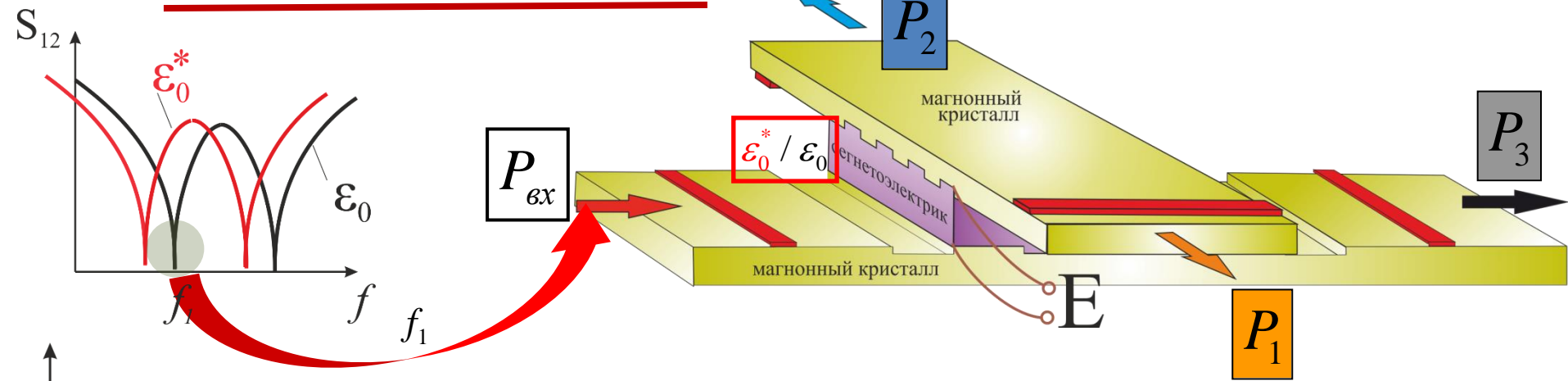
В зависимости от входной мощности большая часть мощности выходит через 2, 3 или 4 порты.

Morozova M.A. et al. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2018. V. 466. P. 119-124.

Морозова М.А. и др. *Физика твердого тела*, 2016, т. 58, вып. 10. с.1899-1906.

Sharaevsky Yu.P. et al. *Spin wave confinement II* edited by S.O. Demokritov. Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., USA. 2017. P. 47-76.

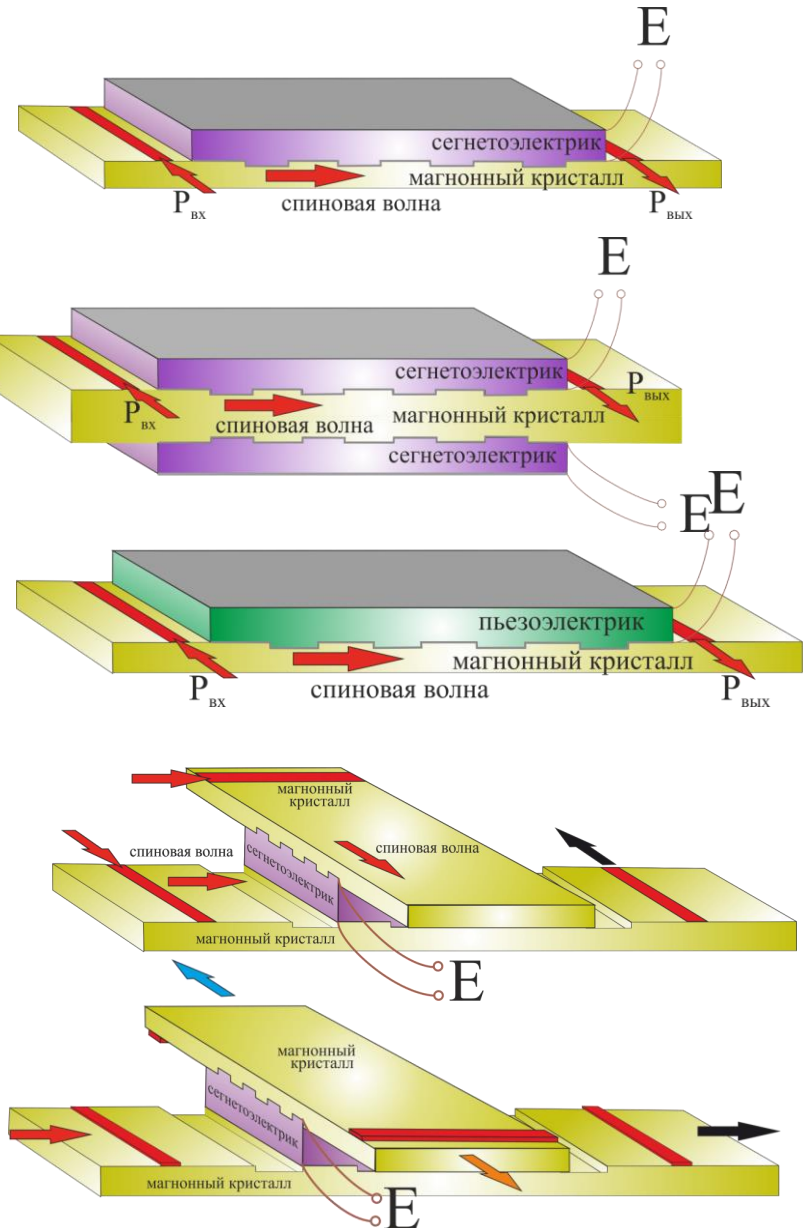
Нелинейный МСМ на основе МК-СЭ-МК (разделение по портам)



| | P_{ex} | P_1 | P_2 | P_3 |
|----------------|-----------|-------|-------|-------|
| ϵ_0 | P_{ex1} | 1 | 0 | 0 |
| | P_{ex2} | 0 | 1 | 0 |
| | P_{ex3} | 0 | 0 | 1 |
| ϵ_0^* | P_{ex1} | 1 | 0 | 0 |
| | P_{ex2} | 1 | 0 | 0 |
| | P_{ex3} | 0 | 1 | 0 |

Выводы

- ✓ Ячейка памяти, сегнетоэлектрический гистерезис
- ✓ Ячейка памяти, уплотнение
- ✓ Ячейка памяти, упругий гистерезис
- ✓ Логический элемент, ячейка памяти
- ✓ Нелинейный синапс, ячейка памяти



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!