

**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

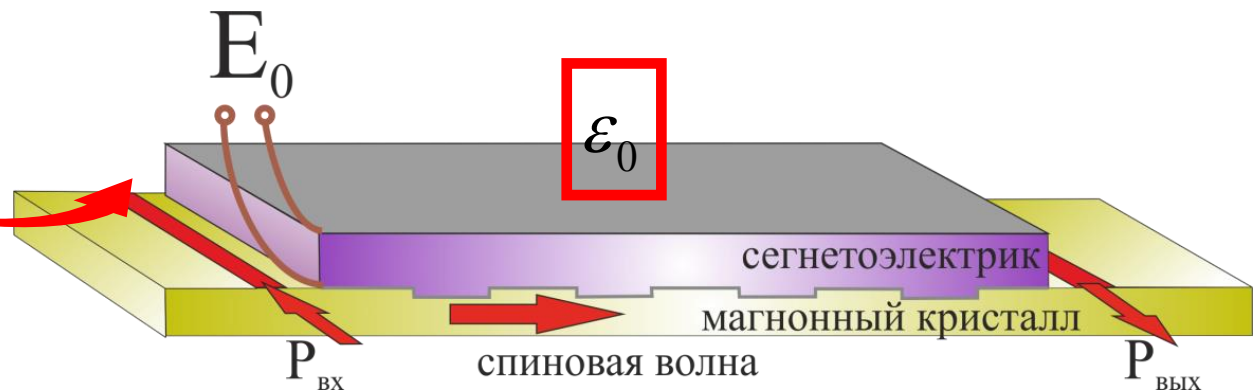
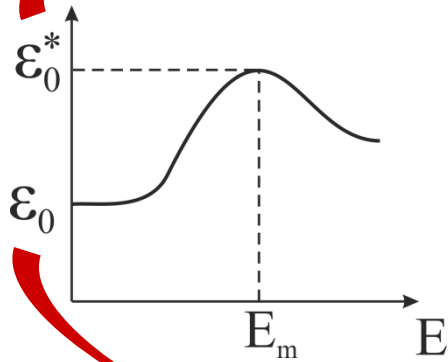
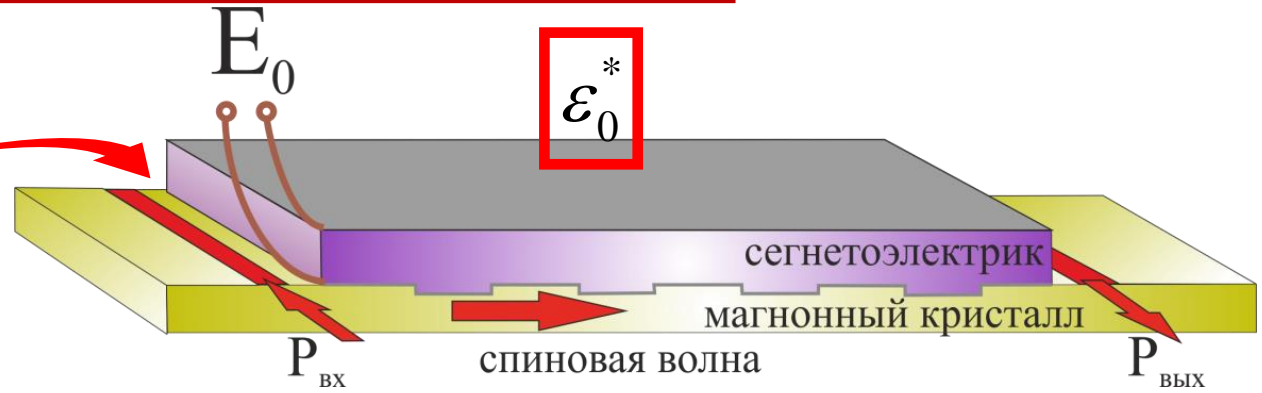
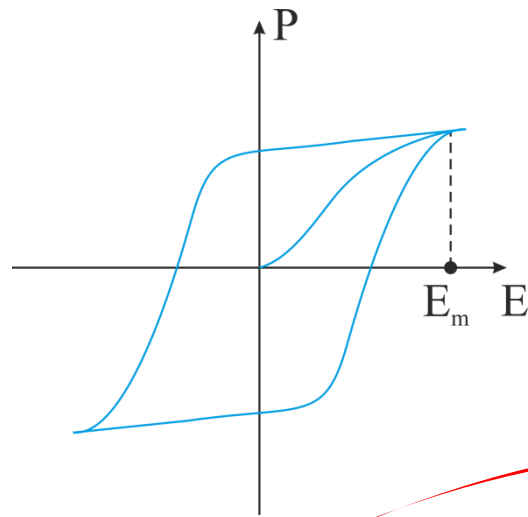
Лаборатория терагерцовой спинтроники

Работа поддержана РФФИ (грант № 19-29-03049-мк).

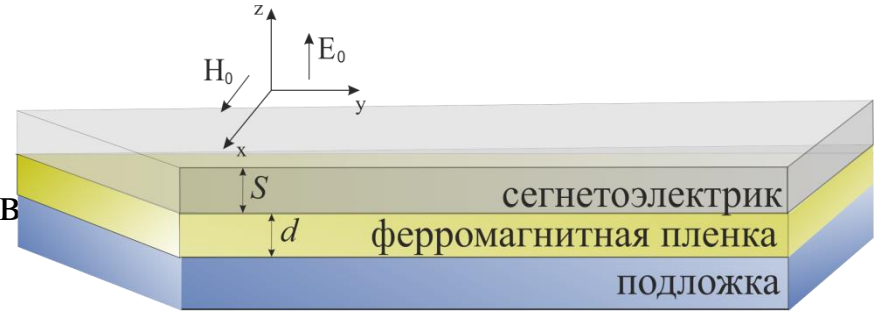
Типы сегнетоэлектрической памяти

	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:

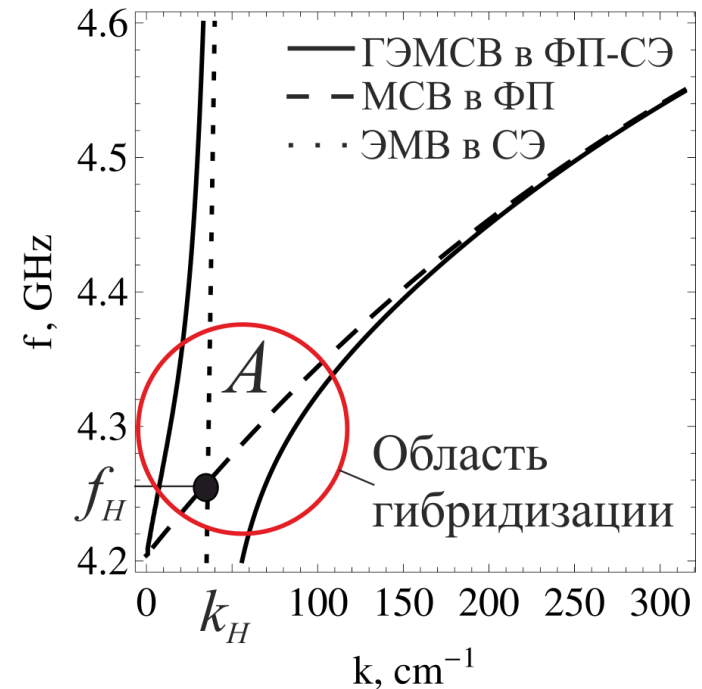
$$\Omega_0^S = 0, \text{ где } \Omega_0^S = \omega^2 - \omega_{\perp}^2 - \frac{\omega_M^2 k_0 d}{4},$$

Дисперсионное соотношение для первой моды ЭМВ в диэлектрике:

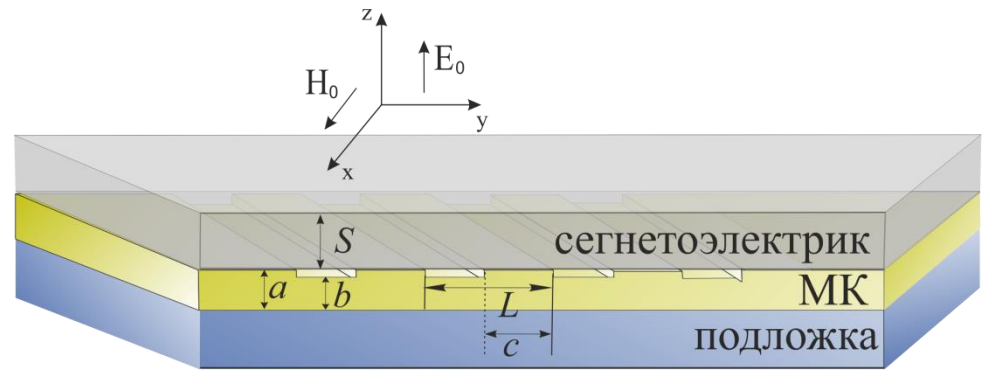
$$\Omega_0^E = 0, \text{ где } \Omega_0^E = \omega^2 - c^2 \frac{2k_0}{\varepsilon S}$$

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



$$\Omega_0^H = 0$$

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



$$-\frac{2c^2}{\varepsilon S} \frac{\partial^4 \varphi}{\partial t^2 \partial y^2} + j \frac{\partial^5 \varphi}{\partial t^4 \partial y} - \frac{2c^2 \omega_{\perp}^2}{\varepsilon S} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + j \omega_{\perp}^2 \frac{\partial^3 \varphi}{\partial t^2 \partial y} - d \left(j \frac{c^2 k_0^2 \omega_M^2}{\varepsilon S} \frac{\partial^3 \varphi}{\partial y^3} + \frac{\omega_M^2}{2} \frac{\partial^4 \varphi}{\partial t^2 \partial y^2} \right) - d \frac{\exp(-2k_0 D) \varepsilon}{c^2} \times \left(j \omega_M \frac{\partial^3}{\partial t^3} - \left(\omega_H \omega_M + \frac{\omega_M^2}{2} \right) \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \varphi = 0$$

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

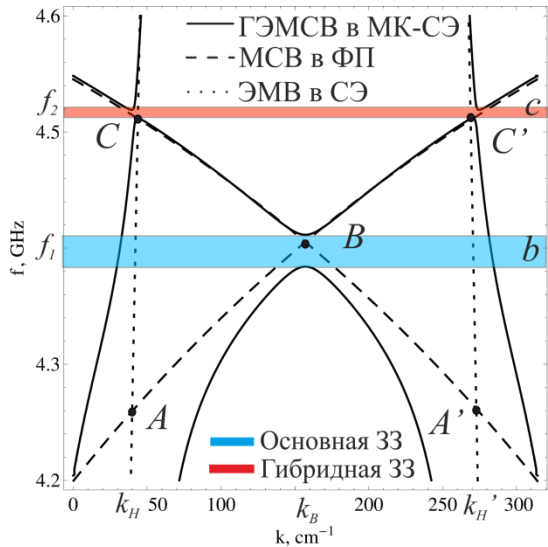
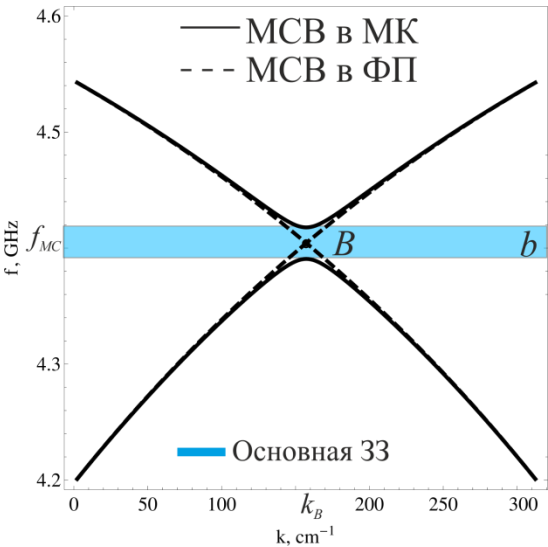
$$\rightarrow d = d_0 \left(1 + \delta d \cos\left(\frac{2\pi}{L} y\right) \right)$$



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

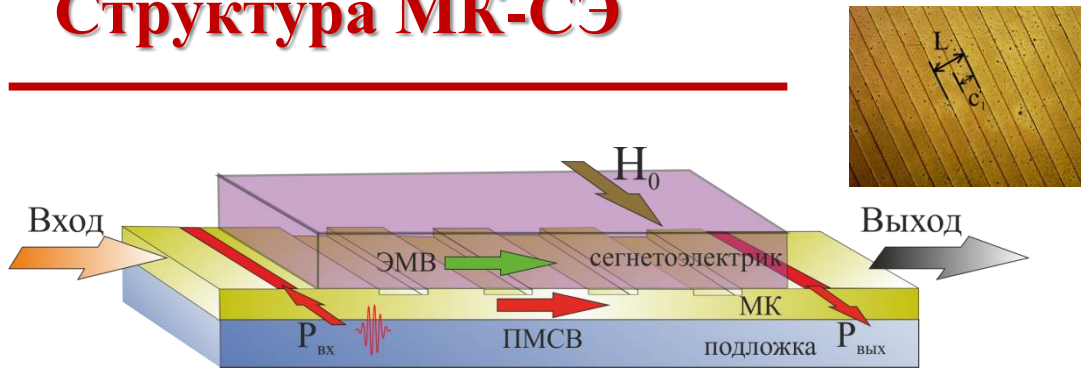
$\beta_{0,-1}^H \propto \delta d$ - коэффициент связи прямых и встречных волн

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



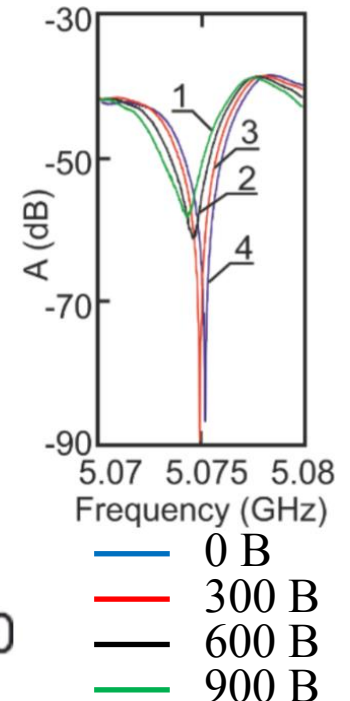
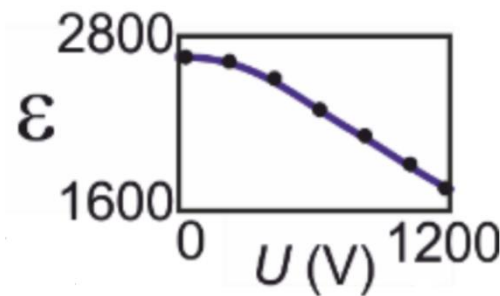
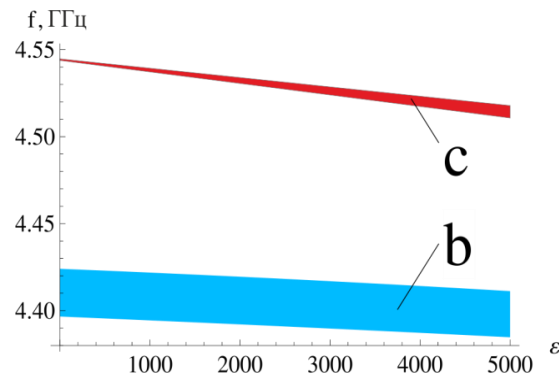
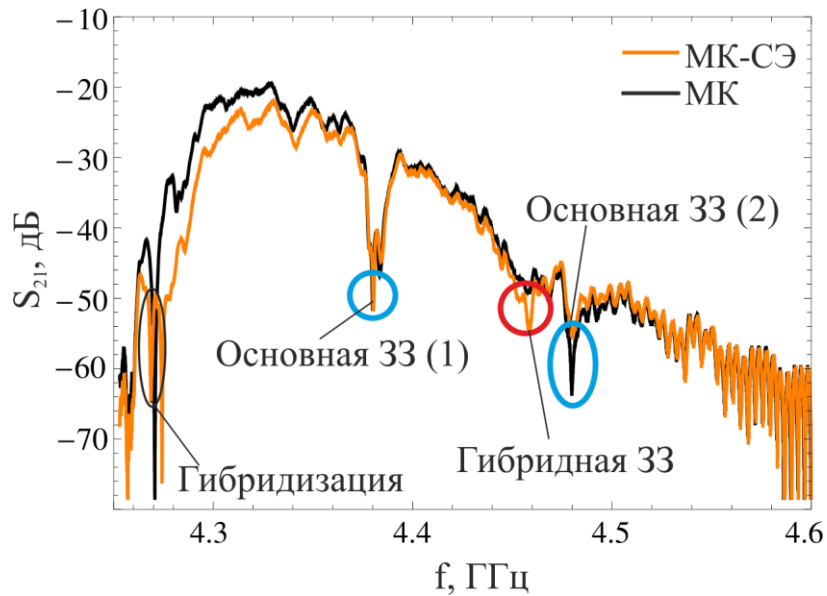
Morozova M.A. et al. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015. Vol. 51, №11, p. 2802504.
Grishin S.V. et al. *IEEE Trans. on Magnetics*. 2014. Vol. 50, No. 11. P. 4006204.

Структура МК-СЭ



Параметры структуры

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



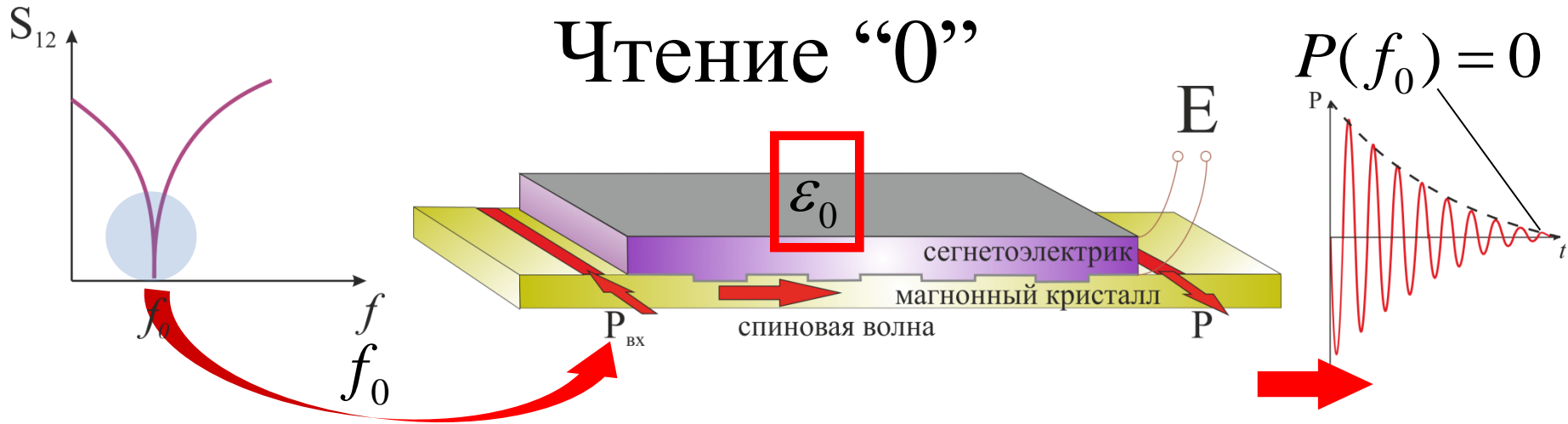
Наложение на МК слоя БСТ приводит к появлению дополнительной гибридной запрещенной зоны.

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.

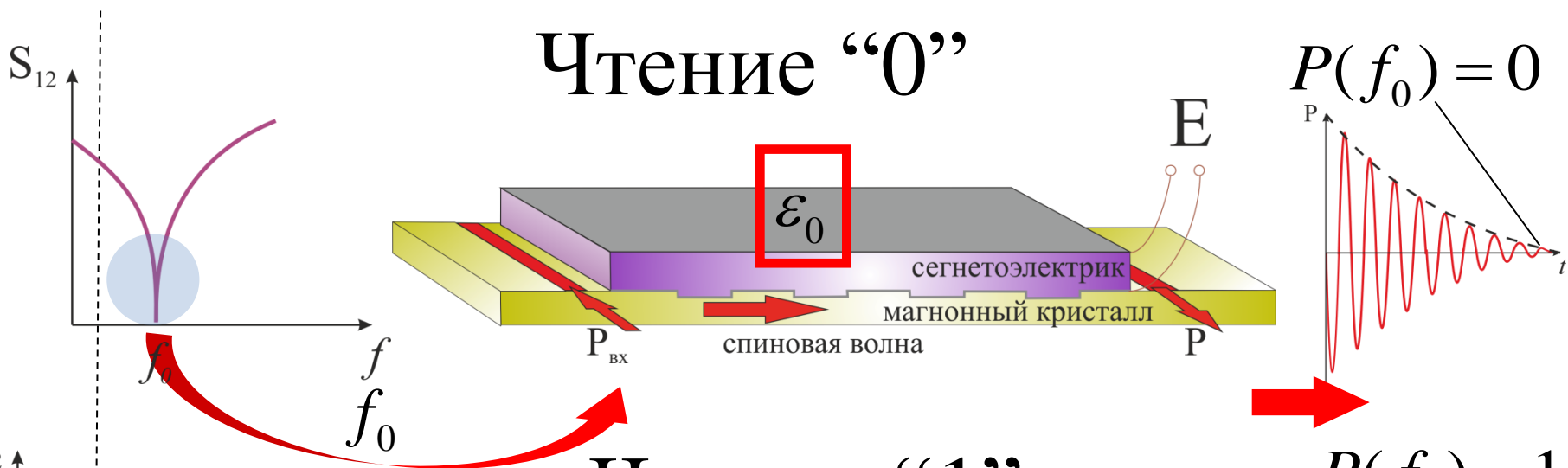
МСМ на основе МК-СЭ

Чтение "0"



МСМ на основе МК-СЭ

Чтение "0"

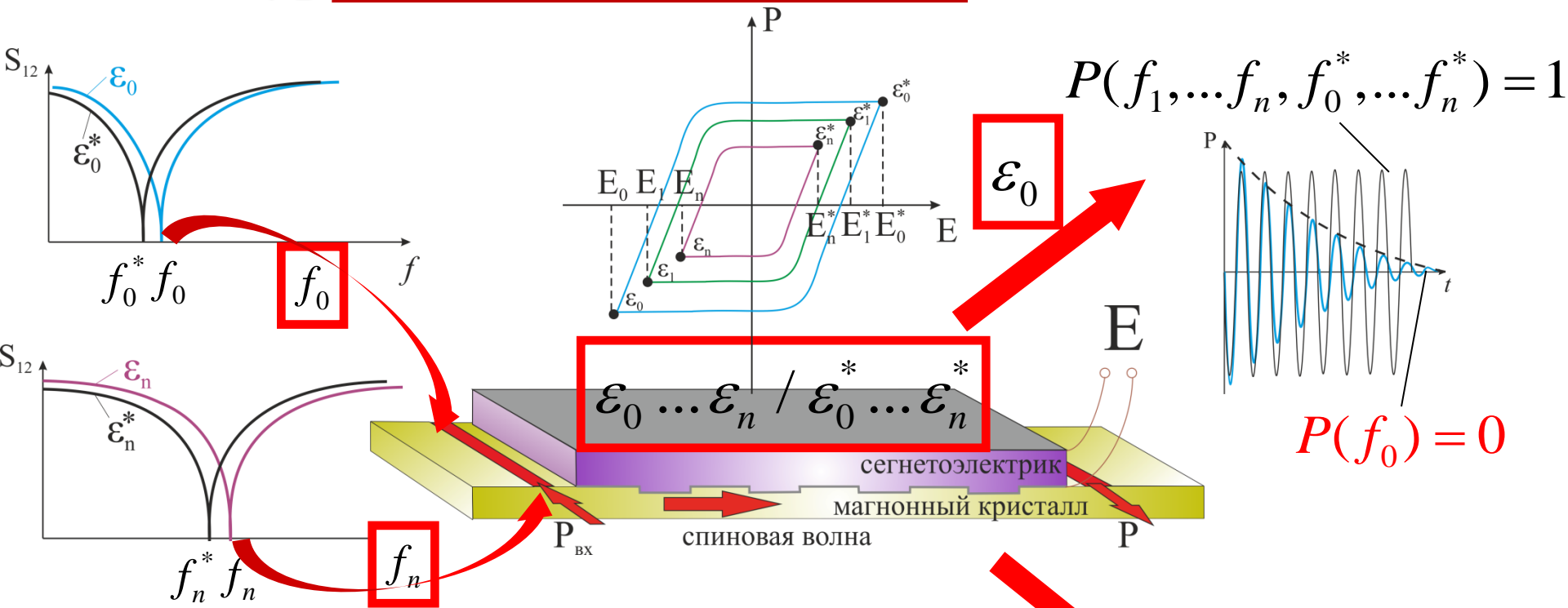


Чтение "1"



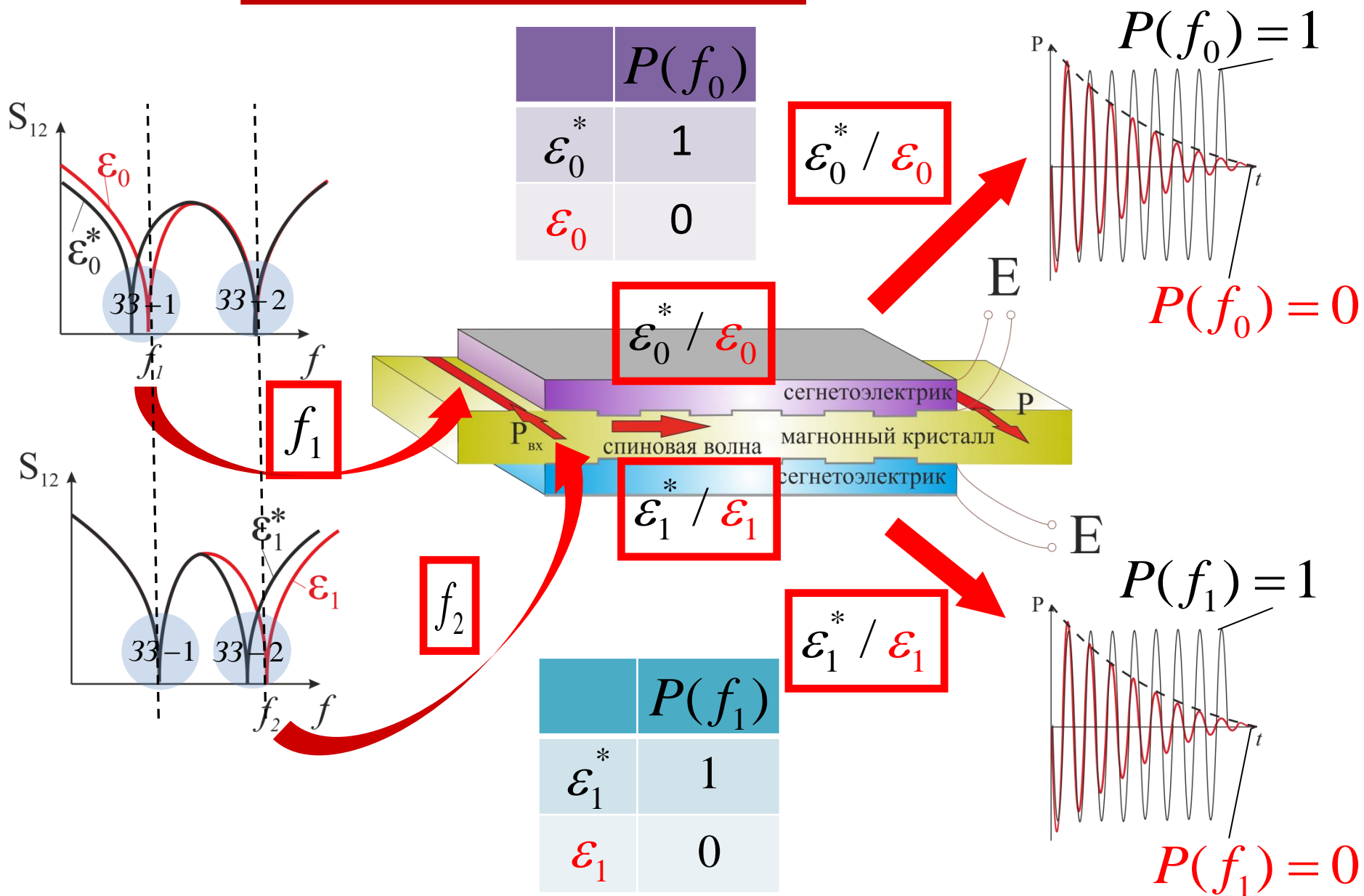
	$P(f_0)$
ϵ_0^*	1
ϵ_0	0

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

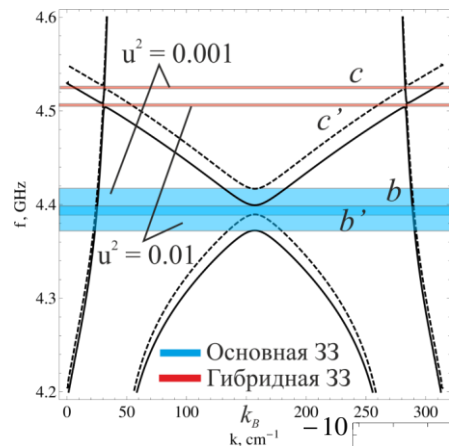
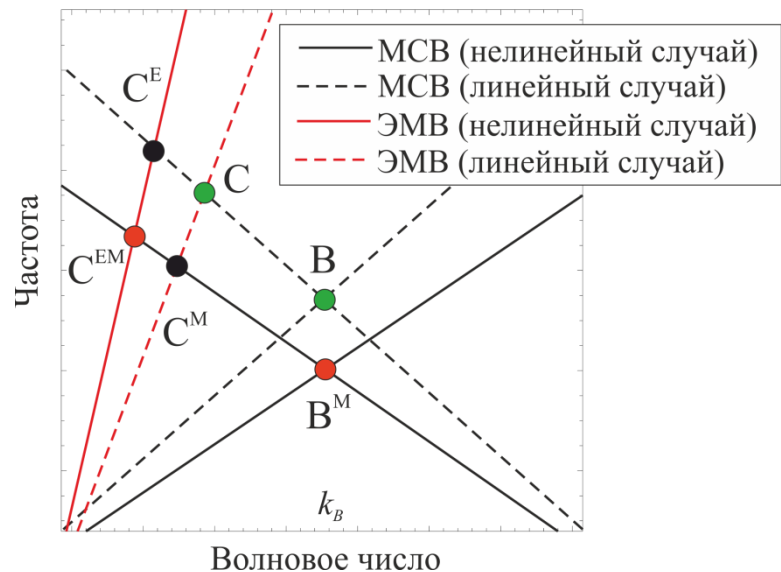
МСМ на основе СЭ-МК-СЭ



Структура МК-СЭ. Нелинейность

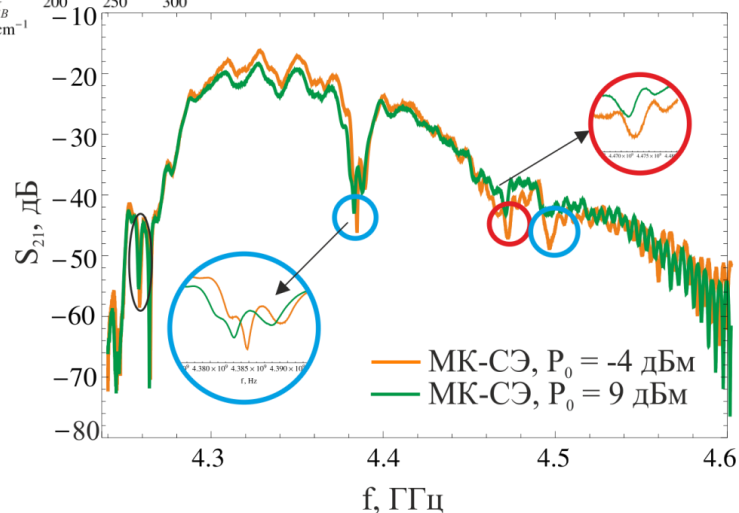
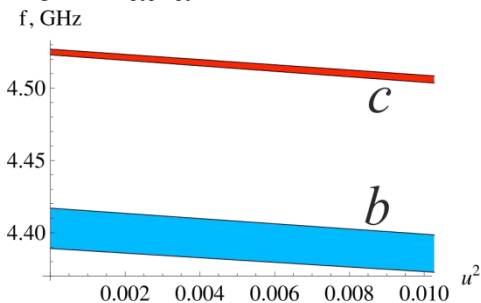
$M_z = M_0(1 - q|u|^2)$ - Магнитная нелинейность q, N - Коэффициенты нелинейности

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



Зависимость от амплитуды входного сигнала

сигнала



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

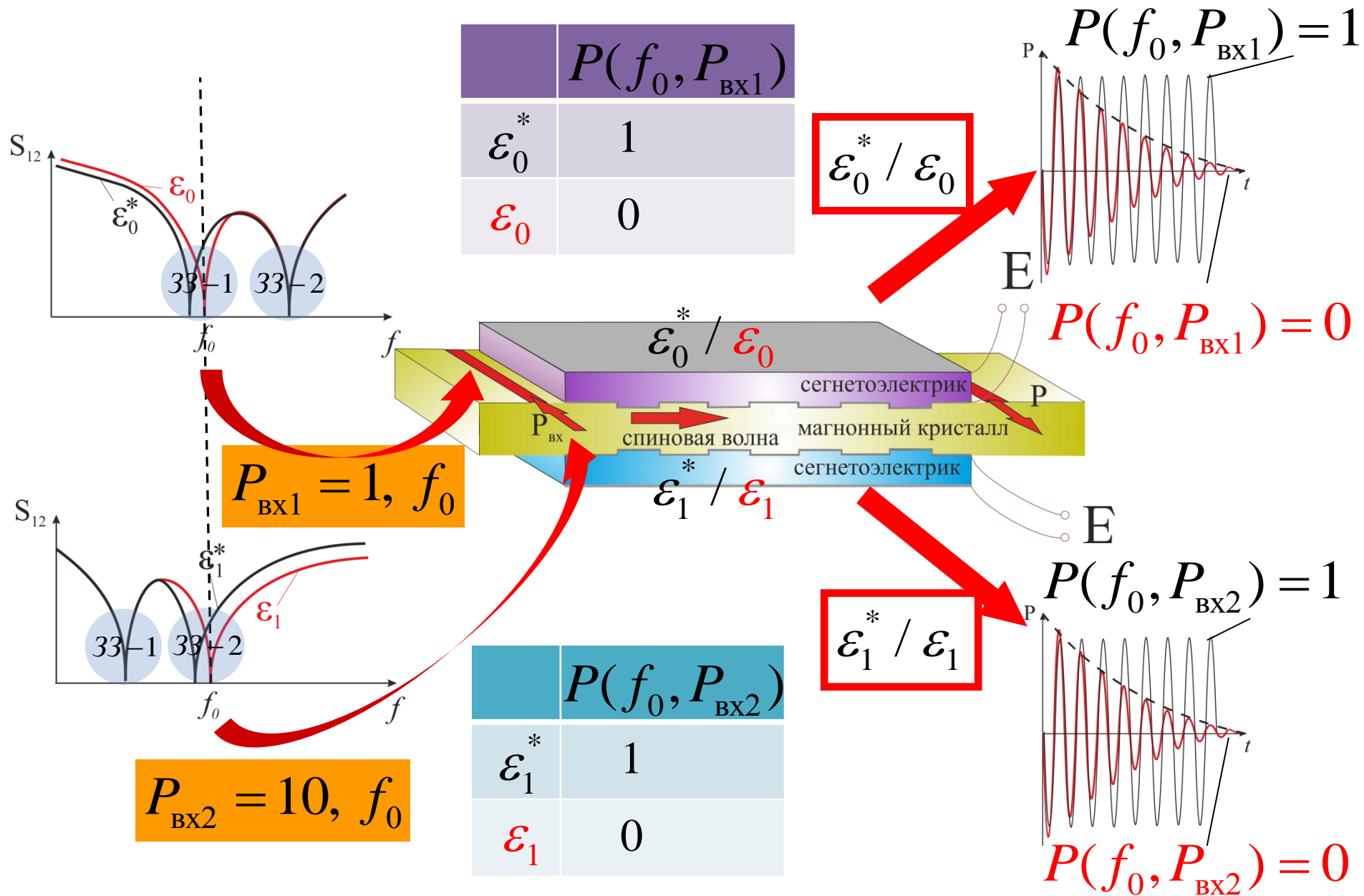
Учет магнитной нелинейности приводит к сдвигу обеих запрещенных зон вниз по частоте, учет электрической – к сдвигу гибридной запрещенной зоны вверх по частоте.

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

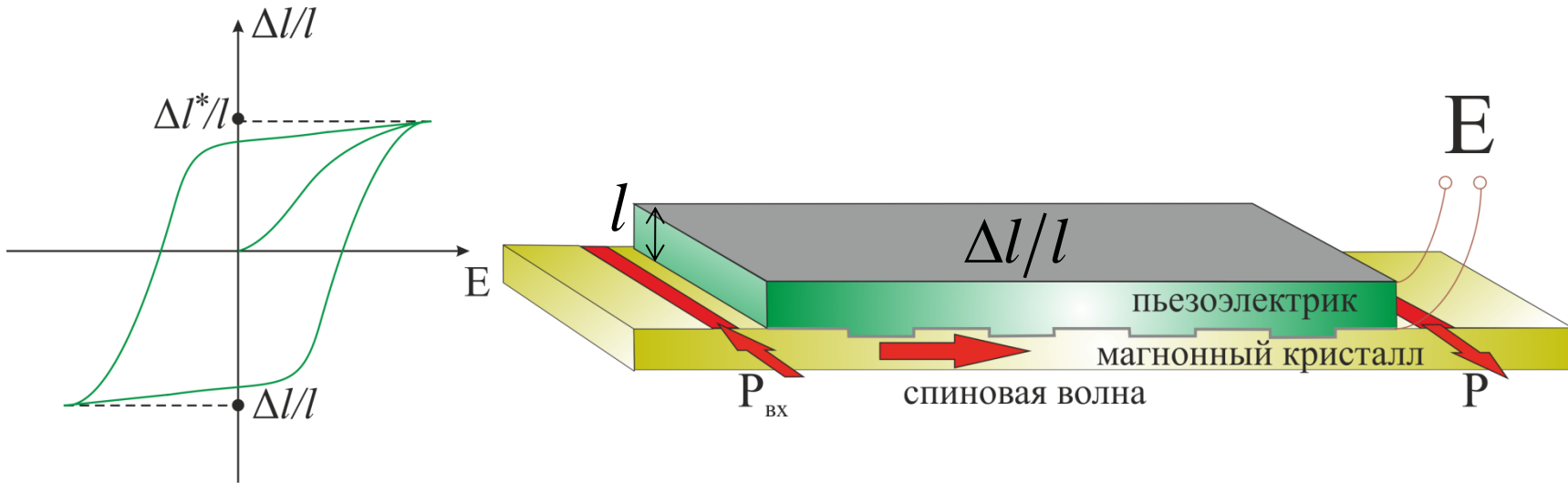
Шараевский Ю.П., Морозова М.А., Гришин С.В. *Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот*. М.: Физматлит. 2009. Гл. 11. С. 348-379.

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

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

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

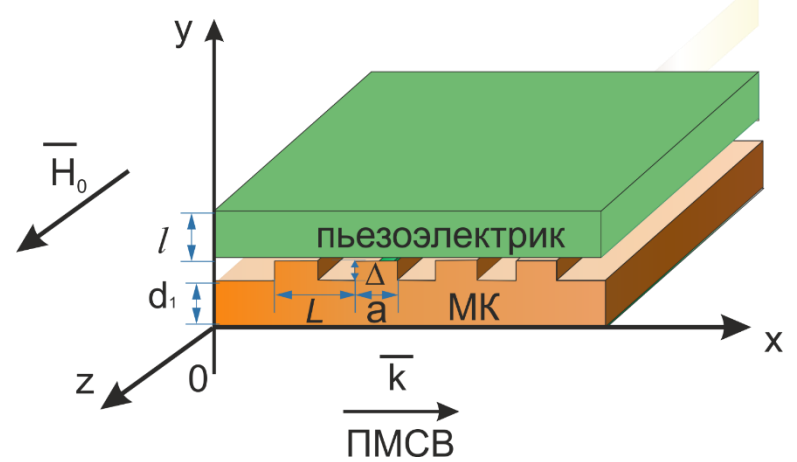
$$D_0 D_{-1} = (\kappa_{+\delta d} + s\kappa_{\delta H})(\kappa_{-\delta d} + s\kappa_{\delta H})$$

$D_0 = -\omega^2 + \omega_{\perp}^2 + \frac{\omega_M^2 k_0 d_0}{2}$ - 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

$\kappa_{\delta H} = \omega_M \omega_H \delta H$



Параметры структуры

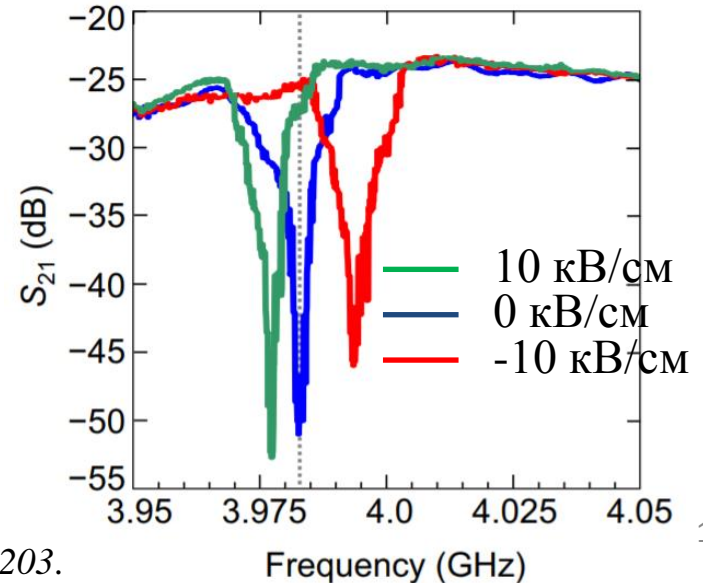
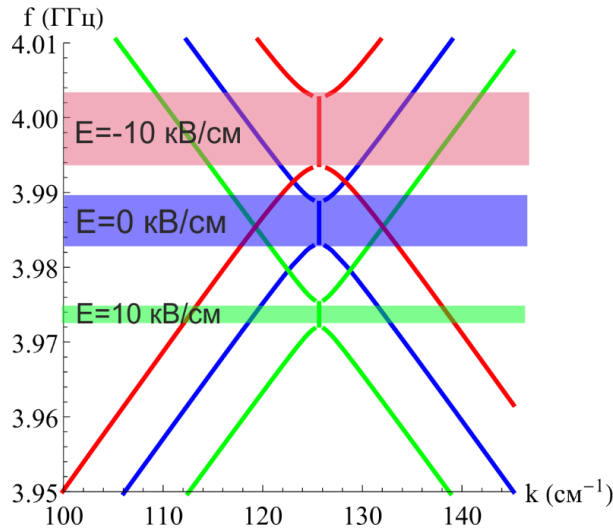
Пьезоэлектрик: пластина PZT

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

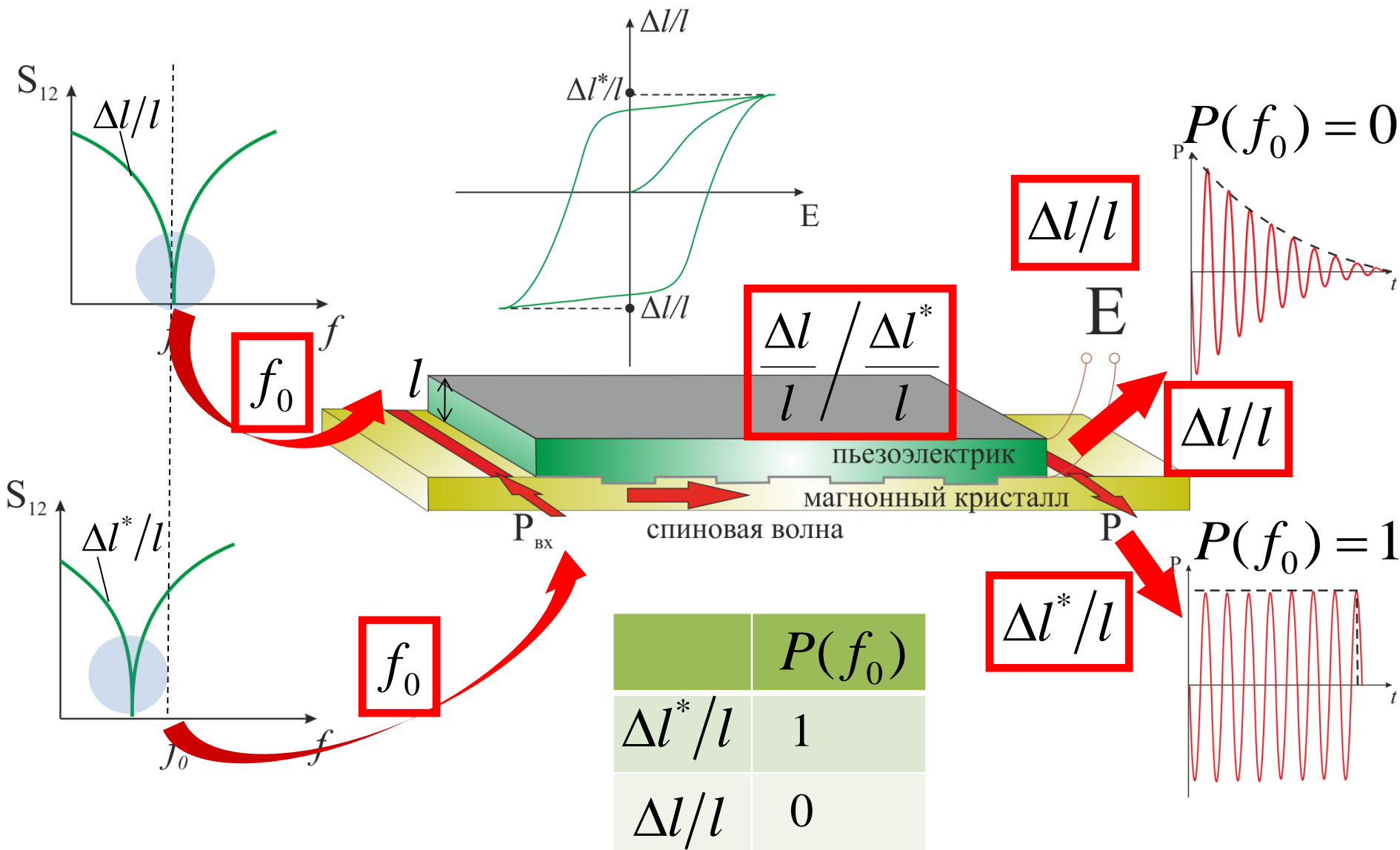
МК: ЖИГ

$d_1 = 10$ мкм

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

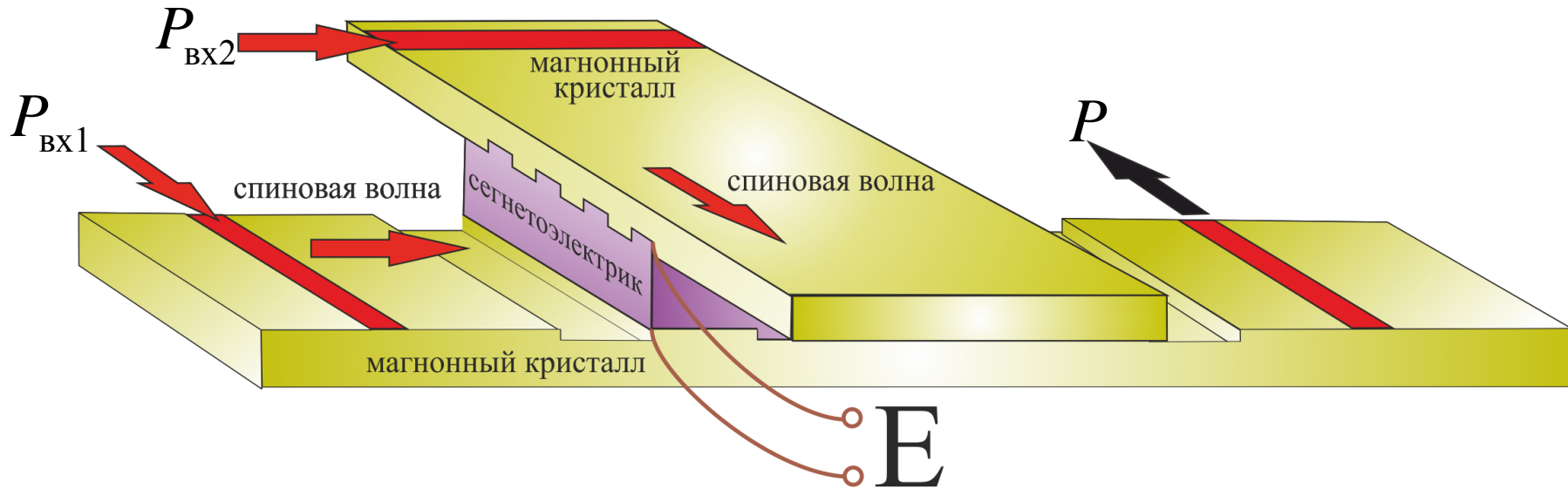


МСМ на основе МК-ПЭ

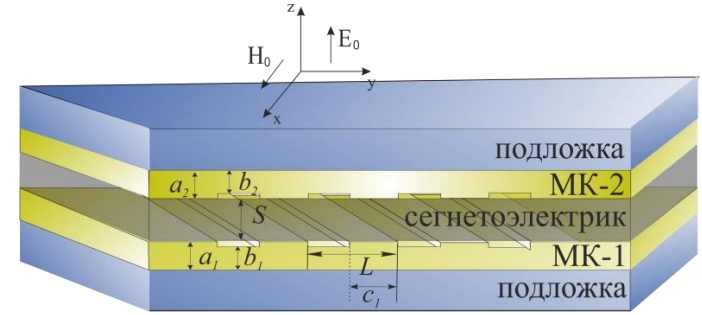


	$P(f_0)$
$\Delta l^*/l$	1
$\Delta l/l$	0

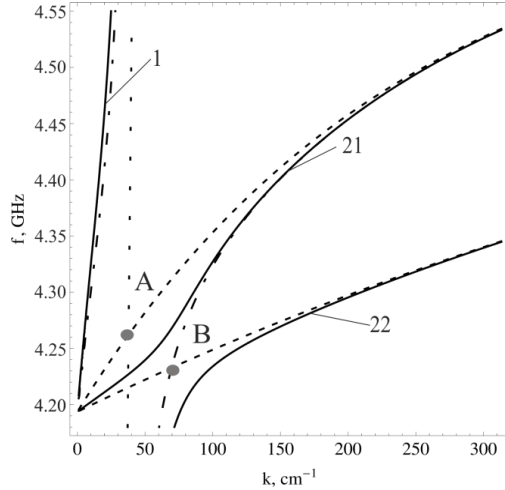
МСМ на основе МК-СЭ-МК (логический элемент)



Структура МК-СЭ-МК

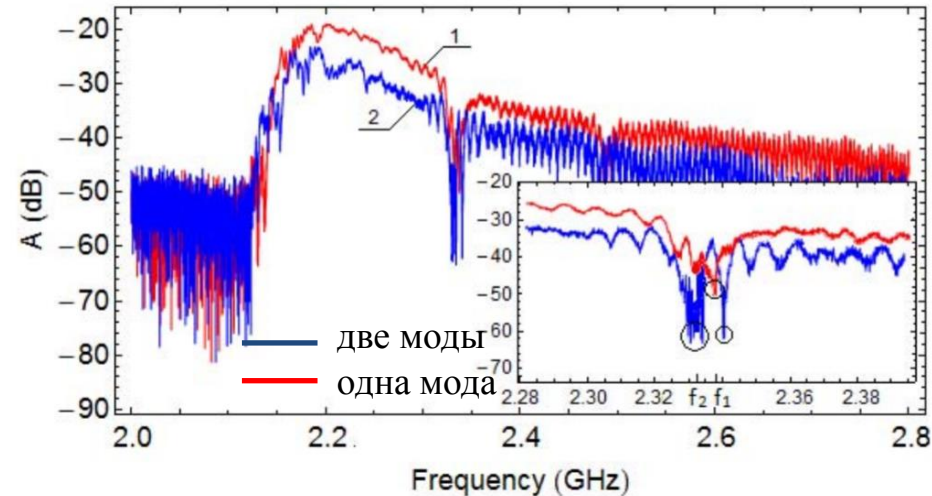
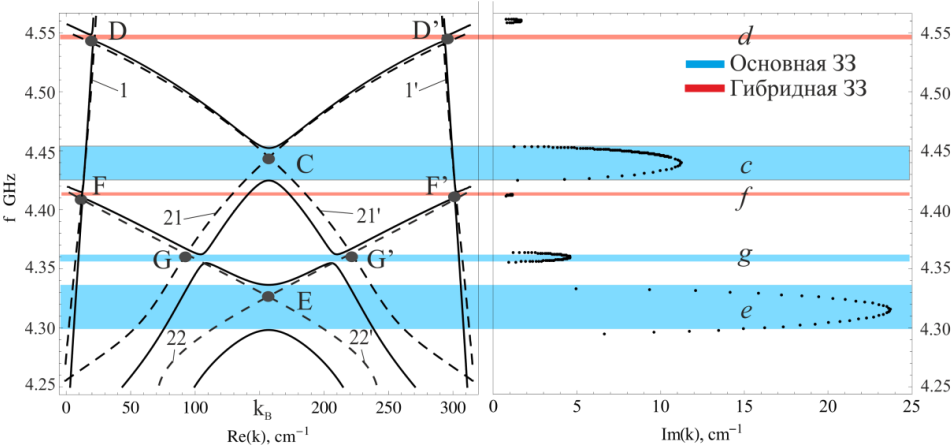
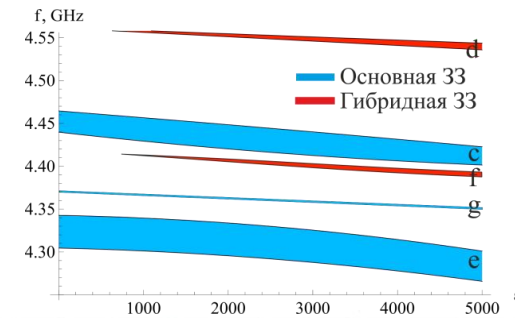


Структура ФП-СЭ-ФП



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

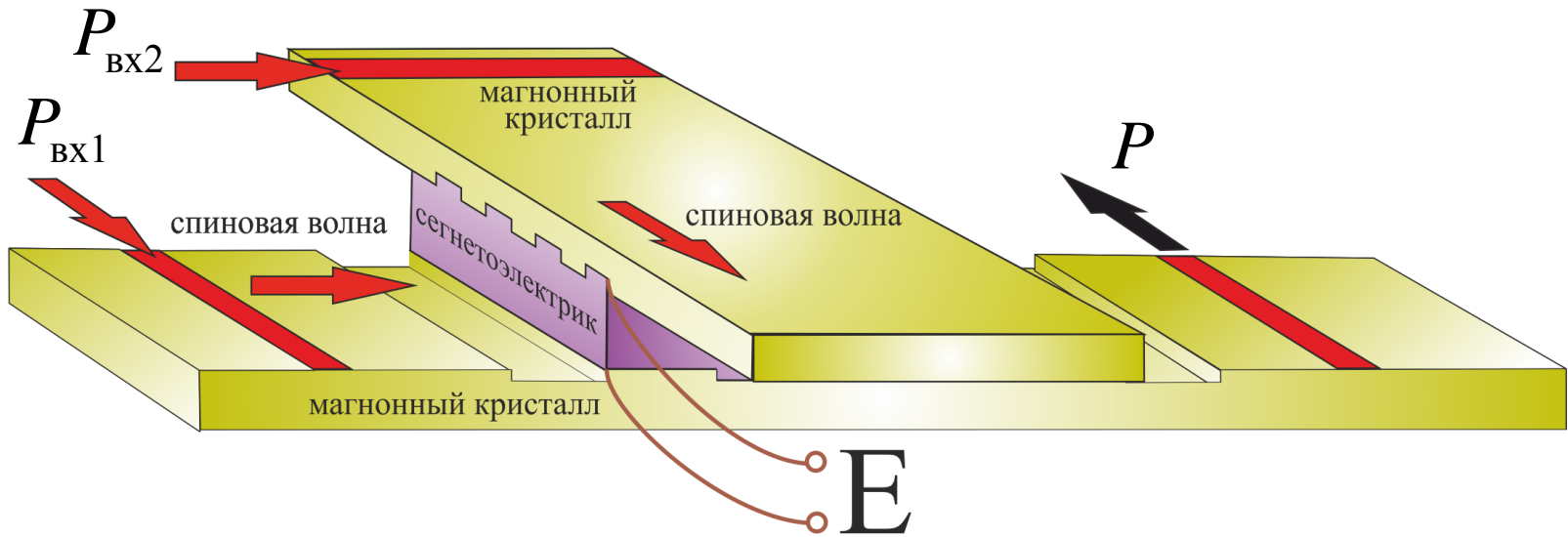
Зависимость от диэлектрической проницаемости СЭ



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.

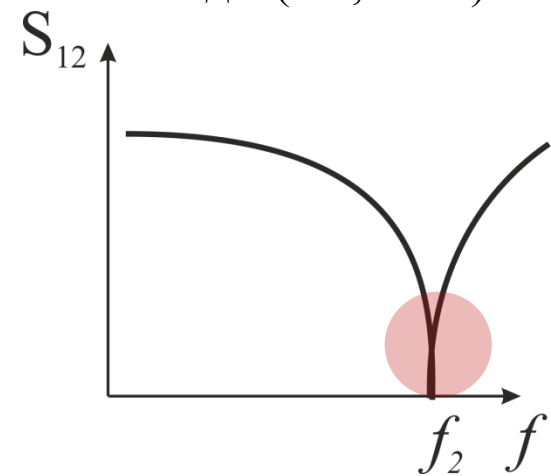
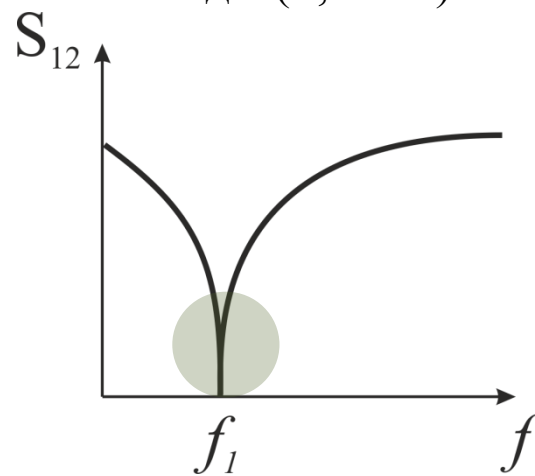
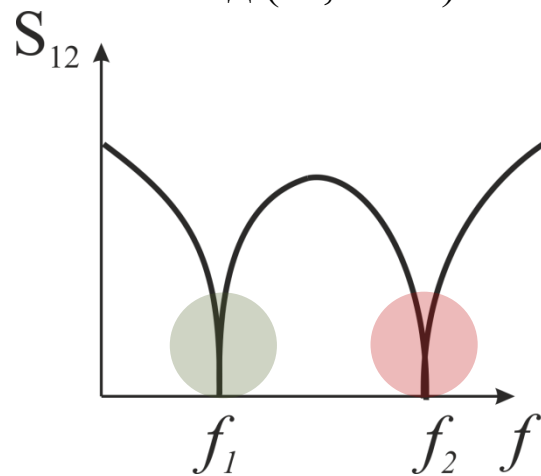
МСМ на основе МК-СЭ-МК (логический элемент)



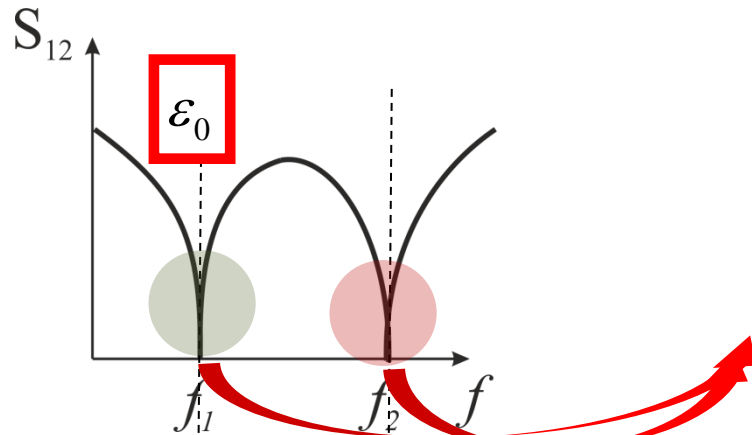
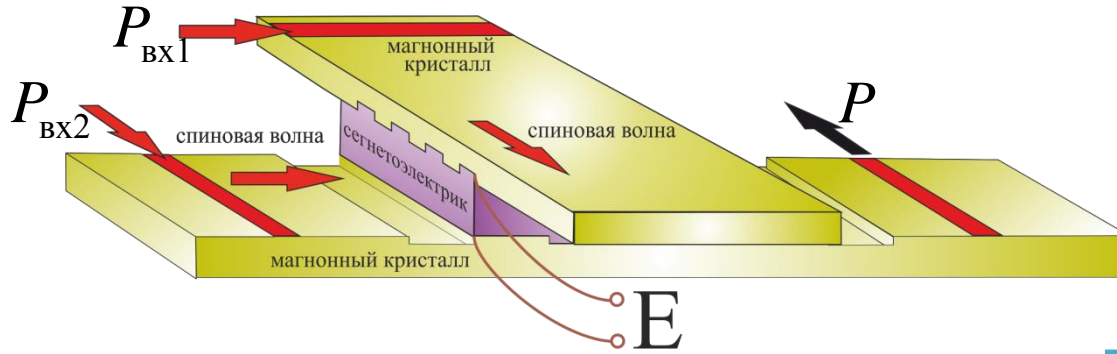
Возбуждение обеих мод (M, «00»)

Возбуждение симметричной моды (S, «01»)

Возбуждение антисимметричной моды (AS, «10»)

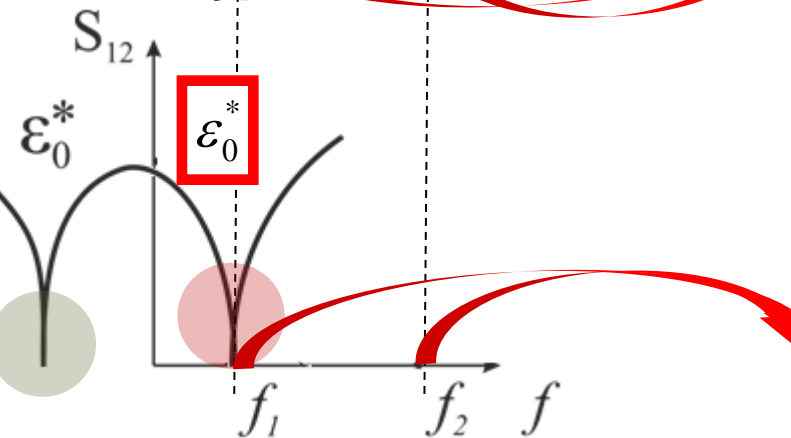


МСМ на основе МК-СЭ-МК (логический элемент)



ИЛИ ($X \vee Y$)

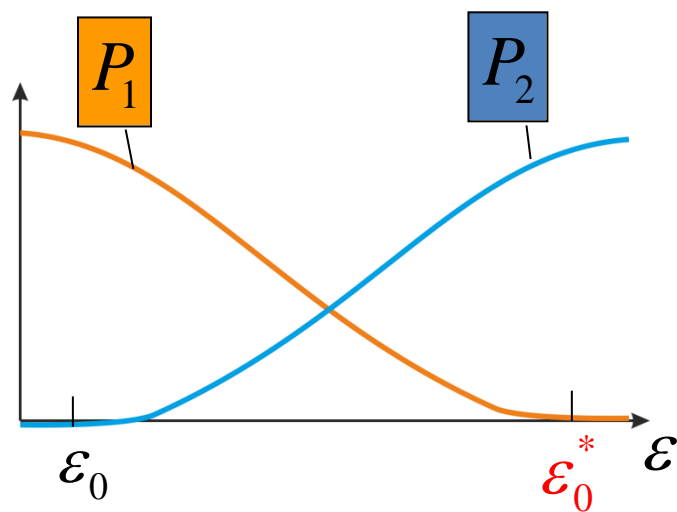
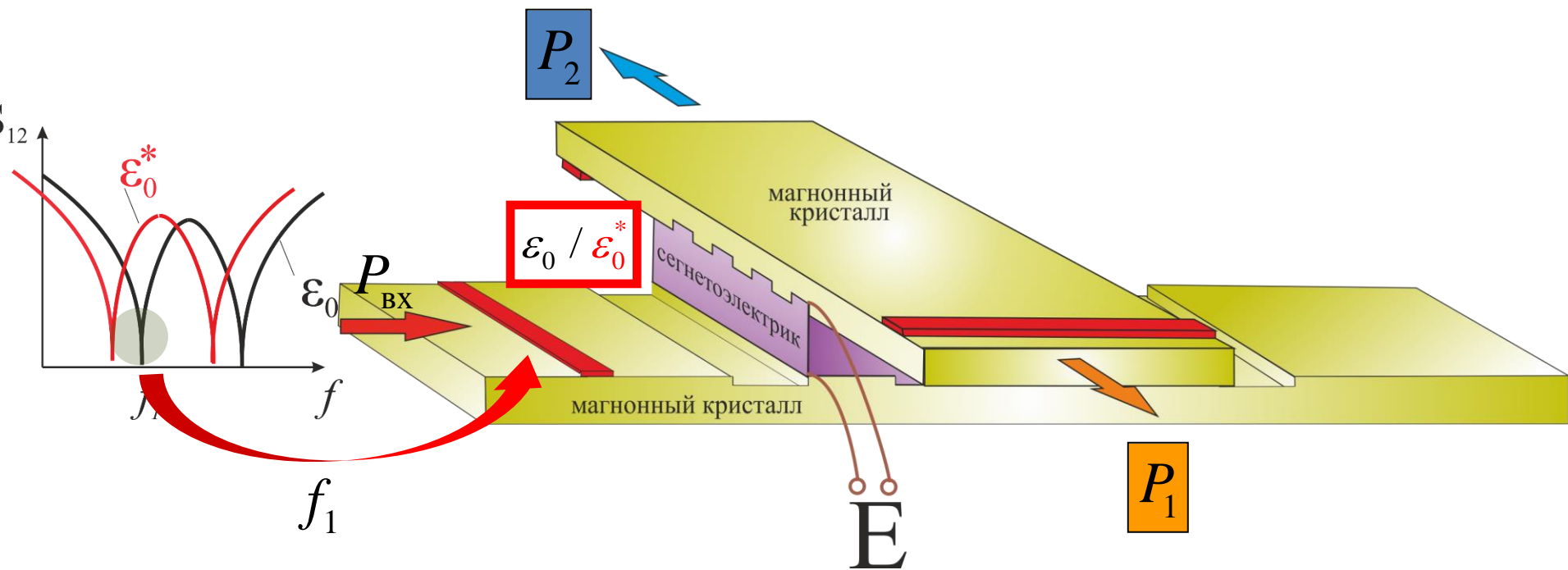
		$P(f_1, f_2)$
M	00	0
S	01	1
AS	10	1
-	11	1



Повторение Y

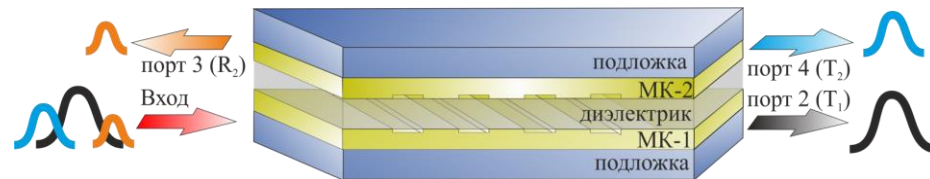
		$P(f_1, f_2)$
M	00	0
S	01	1
AS	10	0
-	11	1

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

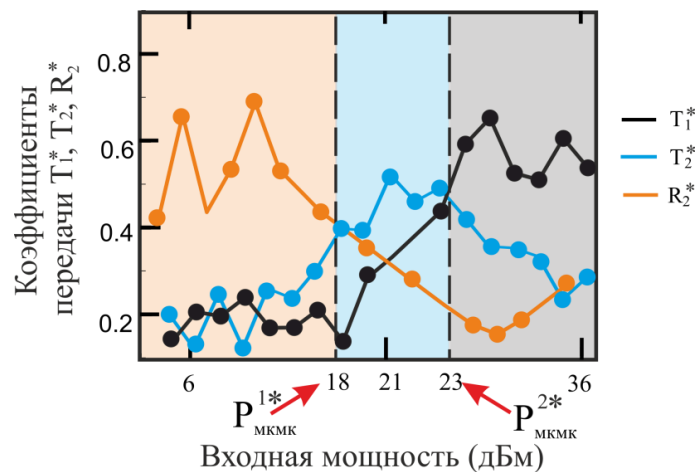
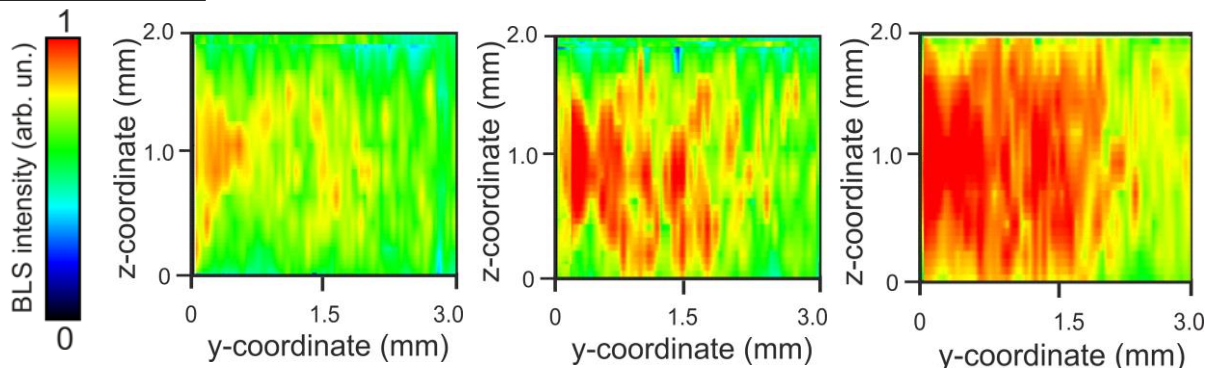


МК 2

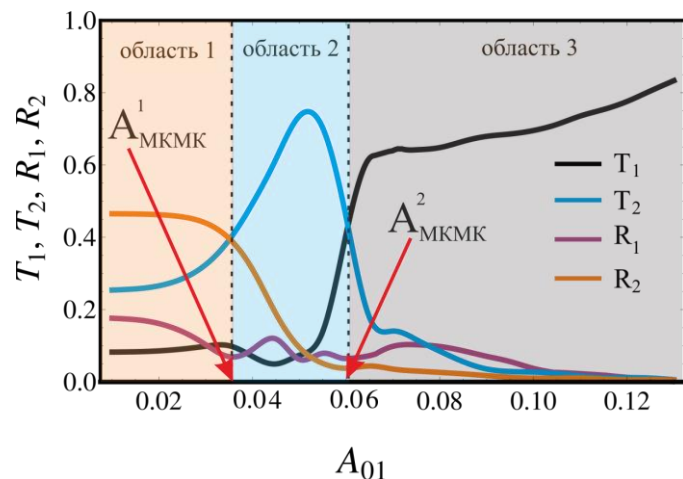
P=6 dBm

P=20 dBm

P=36 dBm



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



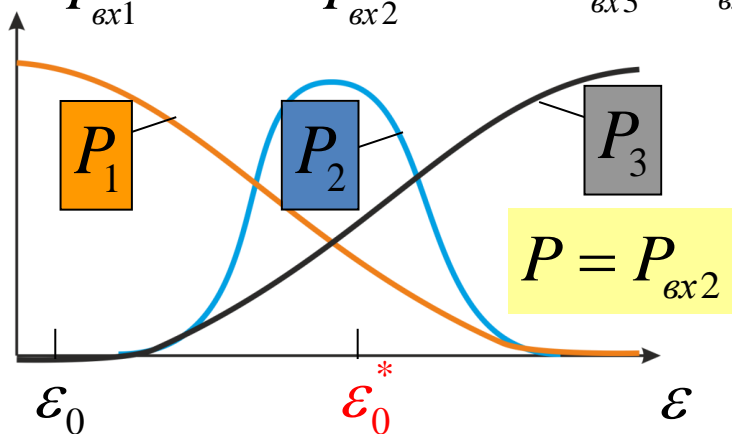
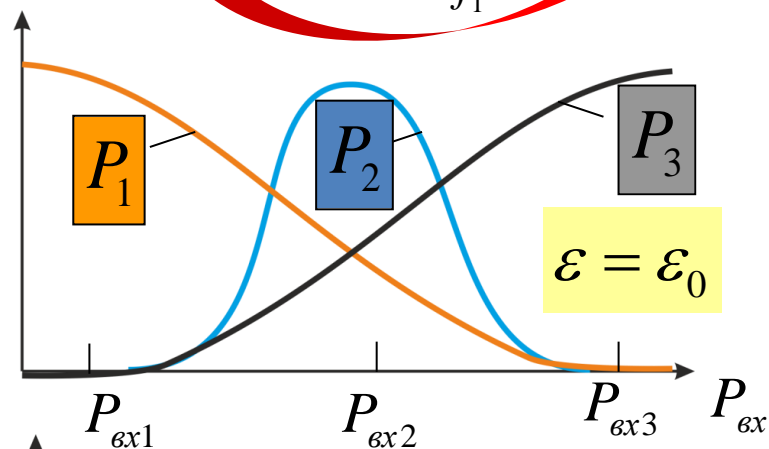
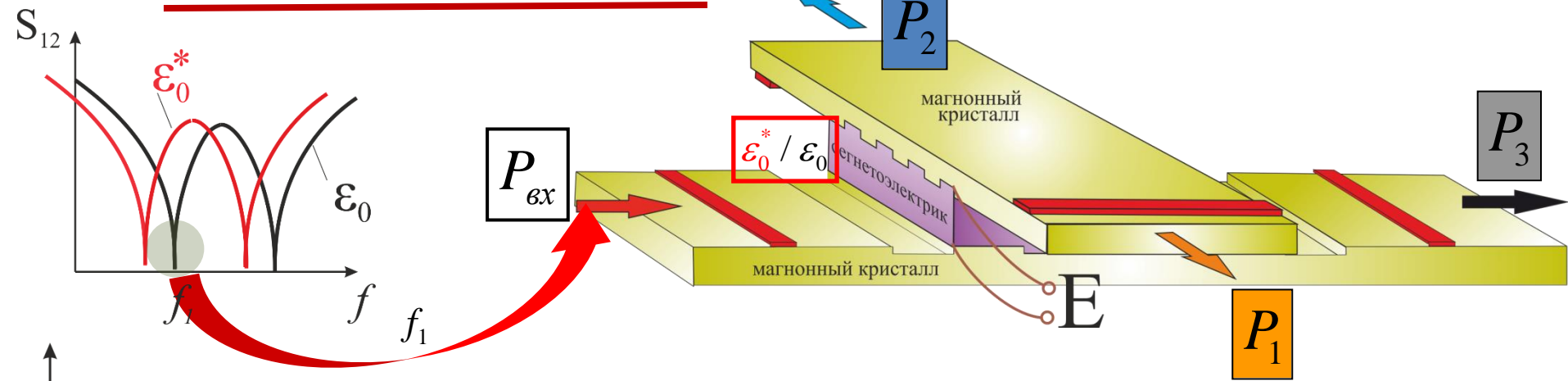
В зависимости от входной мощности большая часть мощности выходит через 2, 3 или 4 порты.

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.

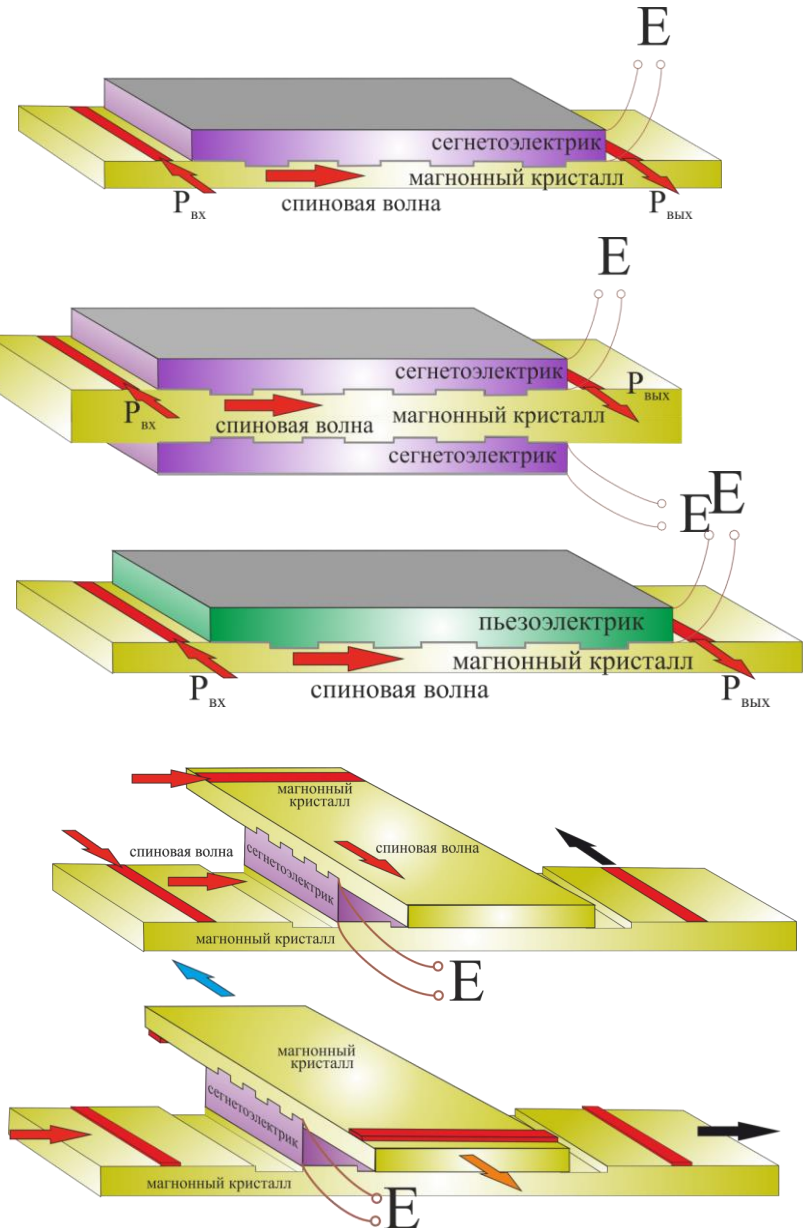
Нелинейный МСМ на основе МК-СЭ-МК (разделение по портам)



	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!