



Стрейнтроника-раздел спинтроники

С.А. Никитов,

Д.В. Калябин, А.В. Садовников, А.Ю. Шараевская,

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,

Саратовский Госуниверситет им. Н.Г. Чернышевского

Мотивация работы

Магнитные пленочные микро- и наноструктуры интенсивно исследуются в качестве возможных кандидатов для создания перспективных устройств спинтроники и магноники. Носителями информационных сигналов в таких устройствах, являются магноны или спиновые волны. **Важным преимуществом** таких носителей по сравнению с традиционной электроникой с переносом зарядов является **отсутствие джоулевого нагрева** среды. В настоящее время в связи с постоянно растущими требованиями к степени интеграции интегральных схем, в технологии создания устройств полупроводниковой электроники наблюдается переход от **двумерных** (планарных) к **трехмерным** вертикально-интегрированным полупроводниковым структурам. Для сохранения конкурентных преимуществ аналогичный переход должен быть реализован и в магнонике, которая базируется на планарных технологиях и магнитных структурах с «горизонтальными» (в плоскости пленки) связями.

Введение

Концепция спинтроники и магноники и обобщенная схема устройства функциональной обработки сигналов

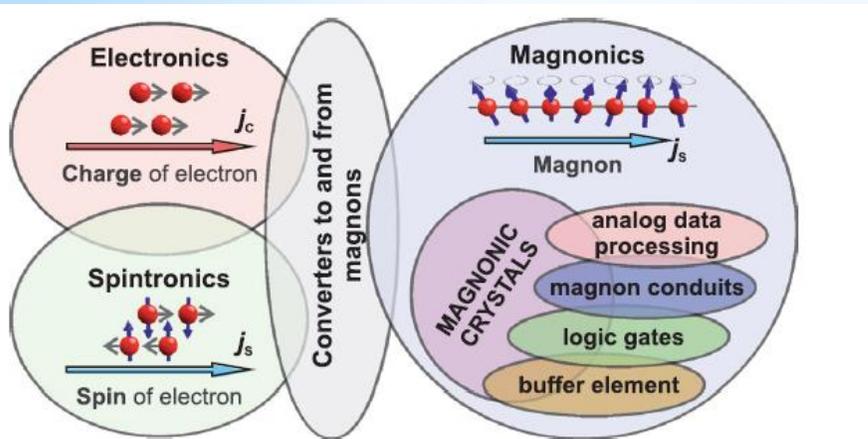
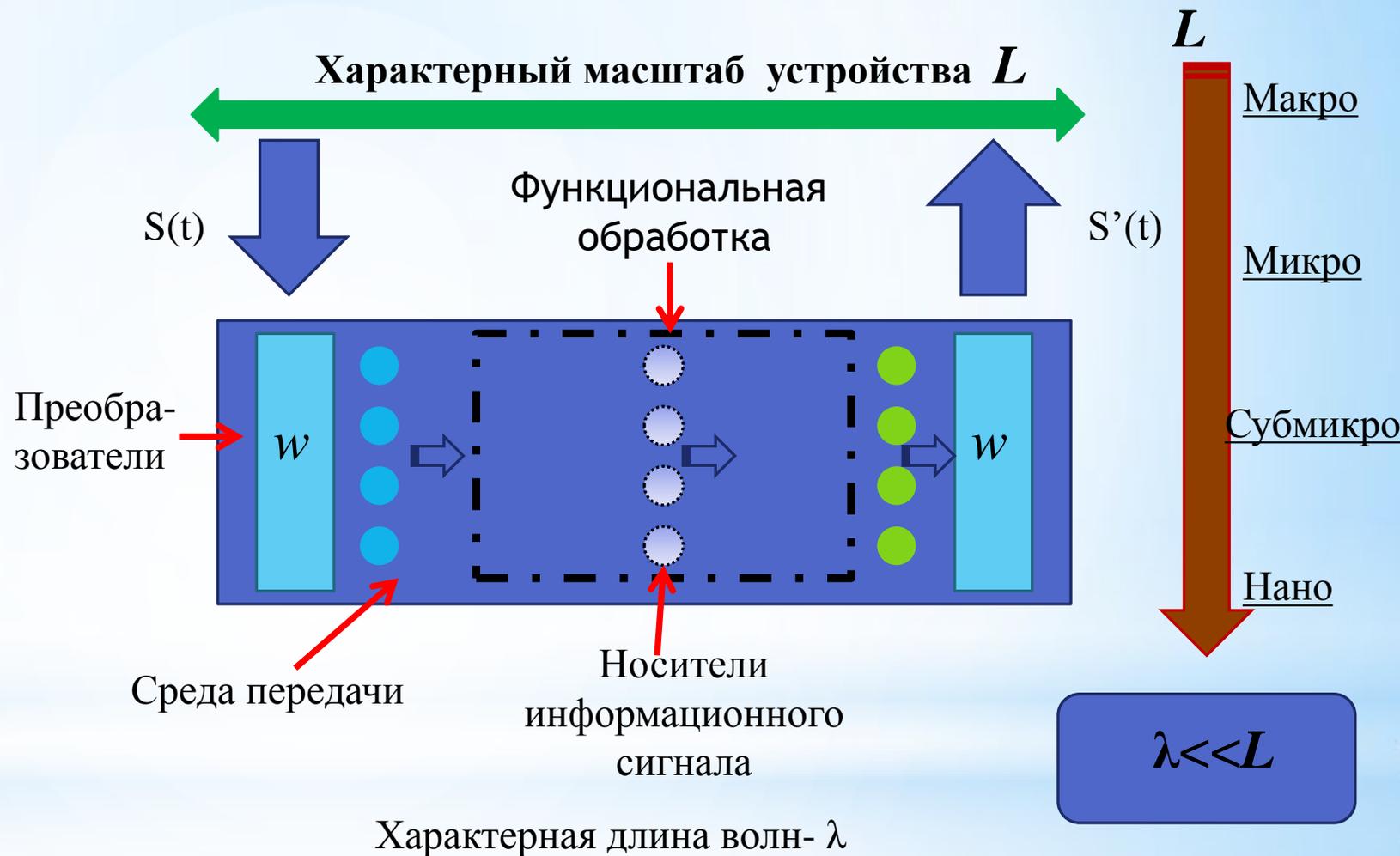


Figure 1. The concept of magnon spintronics. Data coded in charge or spin currents are converted to magnon currents, processed within the magnonic system and converted back. The magnonic crystal is a universal element in the field of magnonics which can be used for data transfer, processing, and buffering.



**Некоторые направления исследований в области систем
функциональной обработки сигналов**

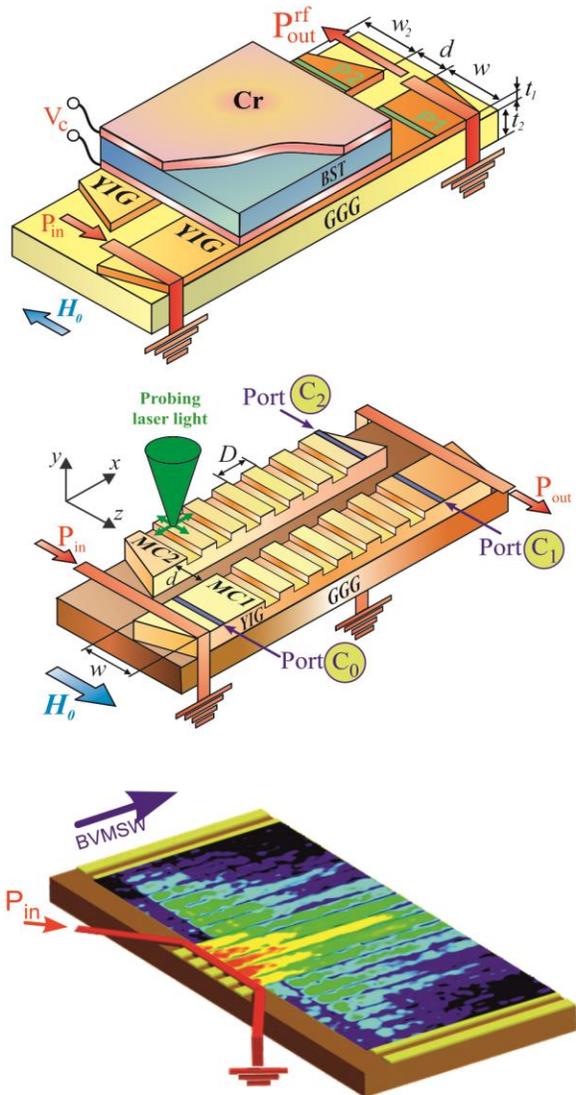
Название	Среда передачи	Носители	Характерная длина волны	Частоты	Проблемы реализации
Электроника	Металл, полупроводник	Электроны, дырки	$2,42 \cdot 10^{-6}$ мкм	ГГц, ТГц	Омические потери, топология межсоединений
Фотоника	диэлектрик	Фотоны, ЭМВ	0.5-10 мкм	40-700 ТГц	Управляемость, масштабируемость
Плазмоника	Диэлектрик-металл	Плазмоны	0.1-1 мкм	ТГц	Затухание, скин-эффект
Спинтроника	Магнетик-металл-диэлектрик	Электроны, спиновые волны	$2,42 \cdot 10^{-6}$ мкм 0.1- ∞ мкм	ГГц	Повторяемость
Магноника	Ферромагнетики, слоистые магнитные структуры, 1D-МК, 2D-МК	Магноны, спиновые и магнитостатические волны	0.1- ∞ мкм	до 100 ГГц, ТГц	Необходимо внешнее магнитное поле

L_d – характерная длина распространения

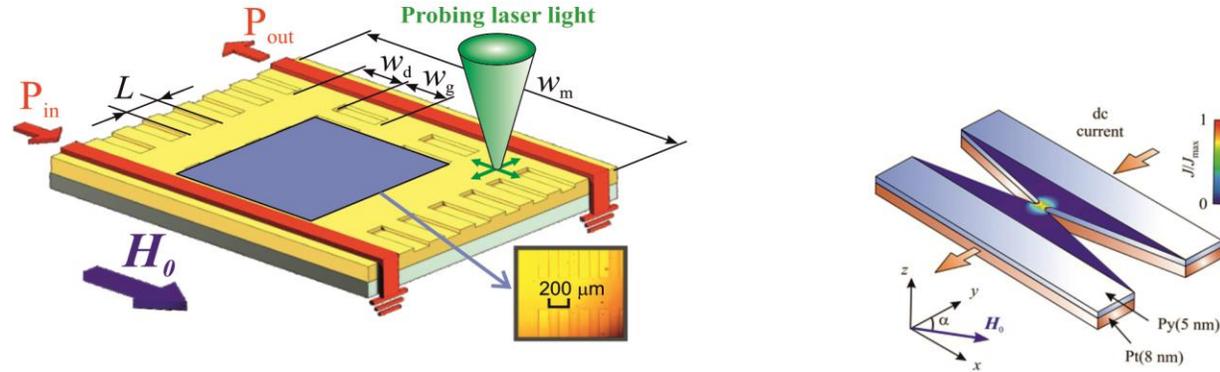


2D логические спин - волновые элементы

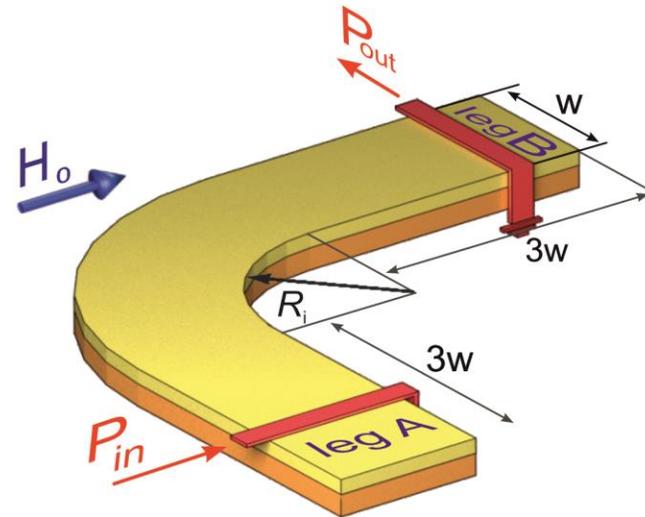
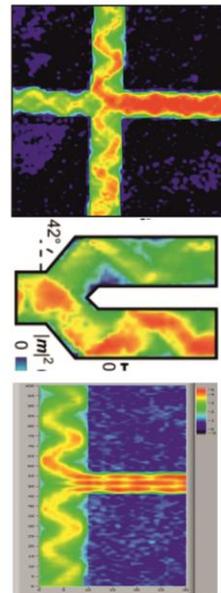
МНОГОКАНАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕННЫЕ ОТВЕТВИТЕЛИ И ДЕЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ

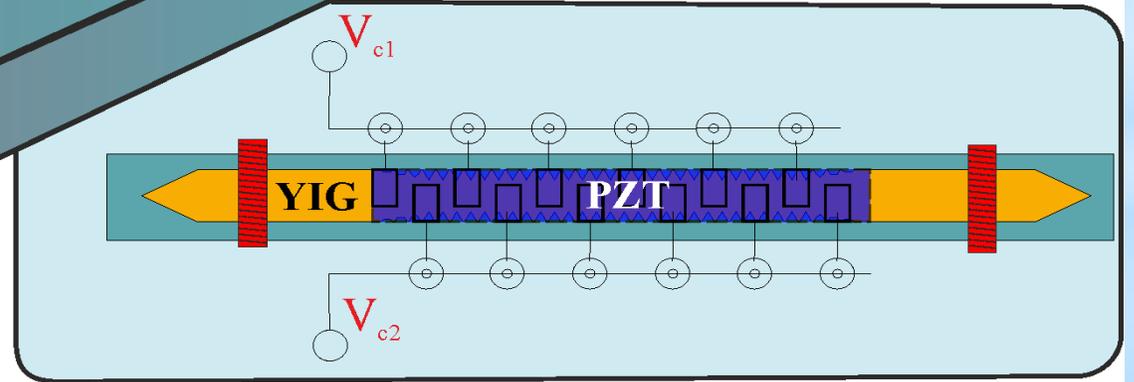
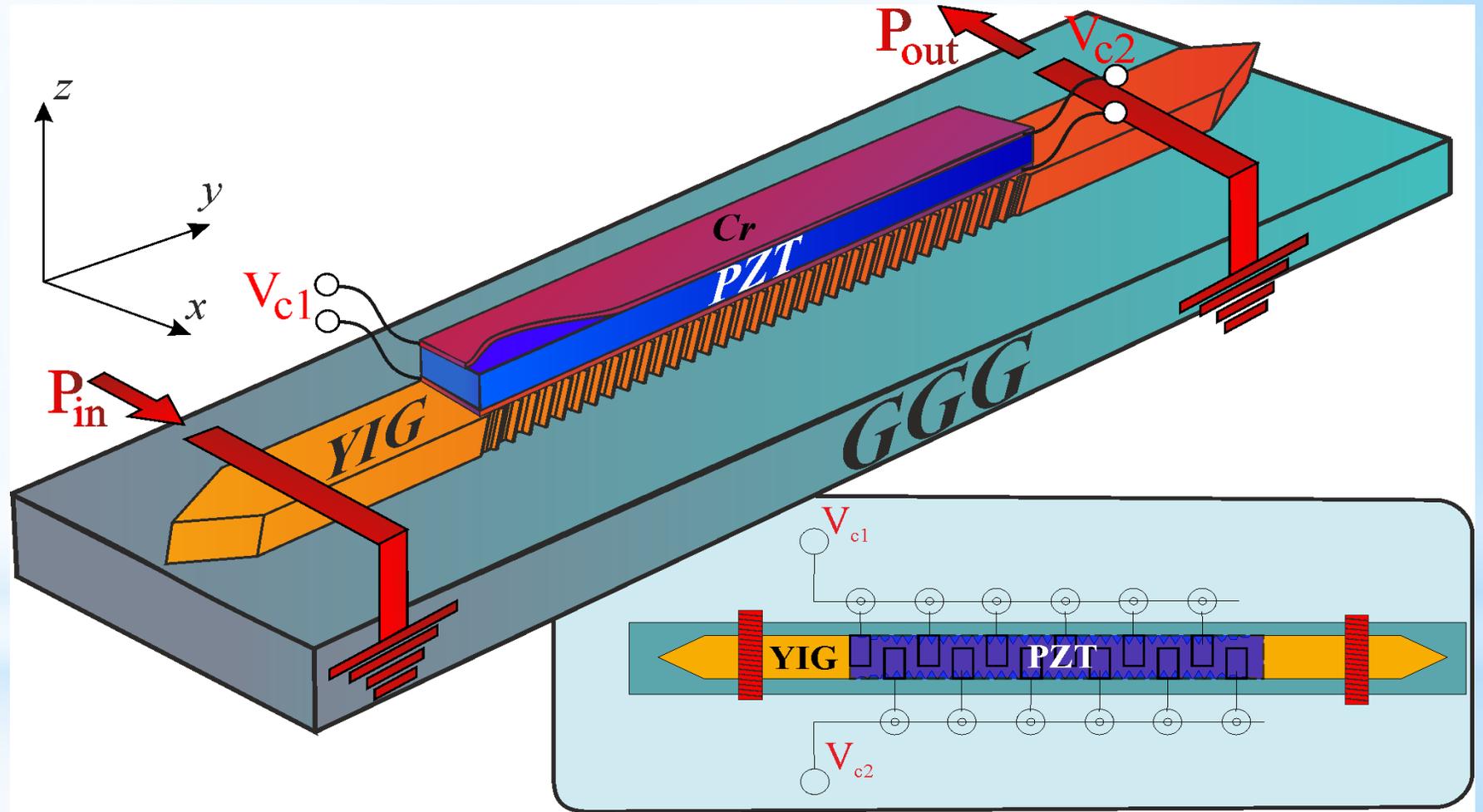
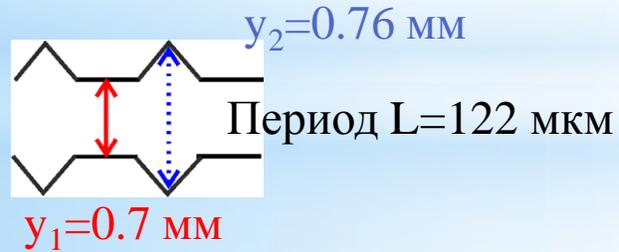


СИСТЕМА ГЕНЕРАЦИИ И ОБРАБОТКИ СПИН-ВОЛНОВОГО СИГНАЛА

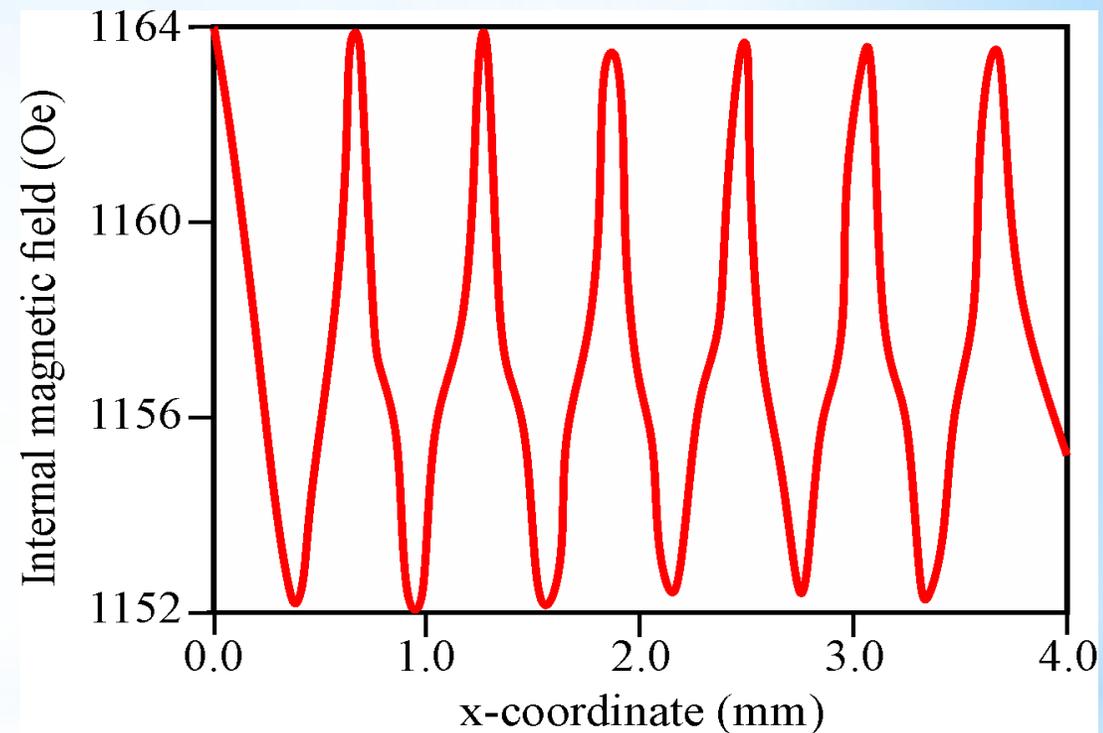
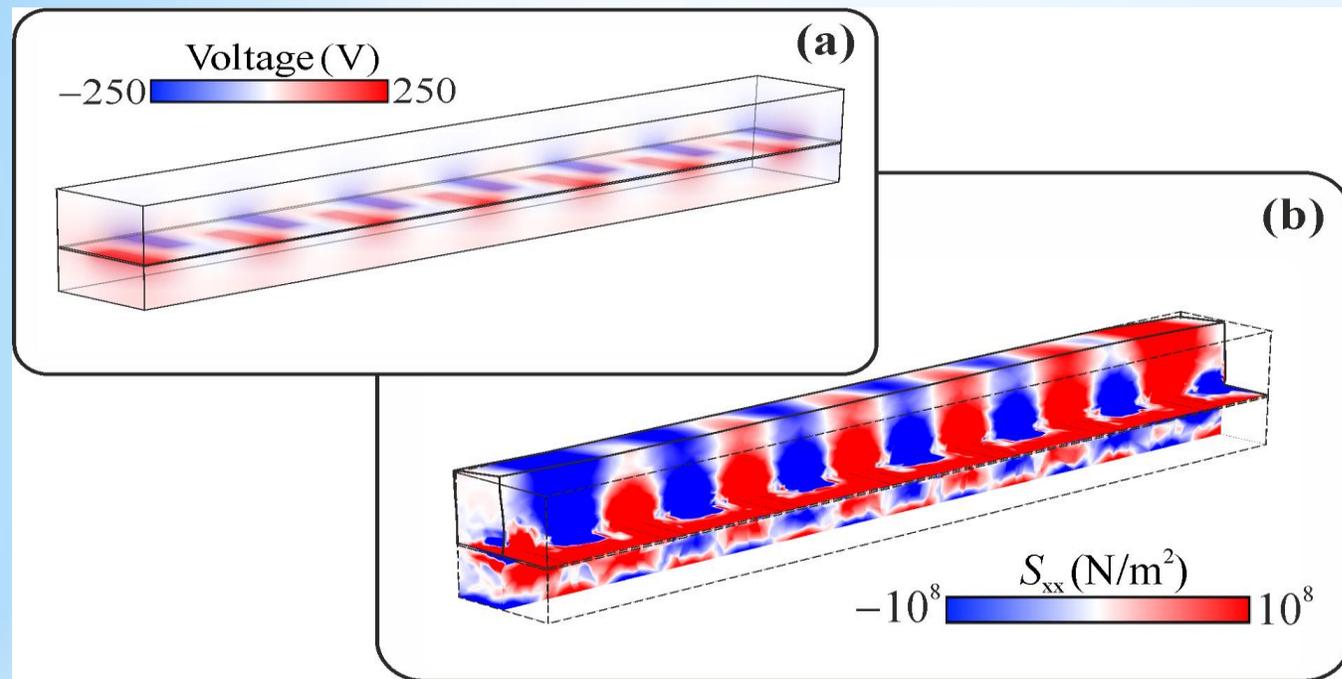


ЭЛЕМЕНТЫ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ В ПЛАНАРНЫХ ТОПОЛОГИЯХ МАГНОННЫХ СЕТЕЙ



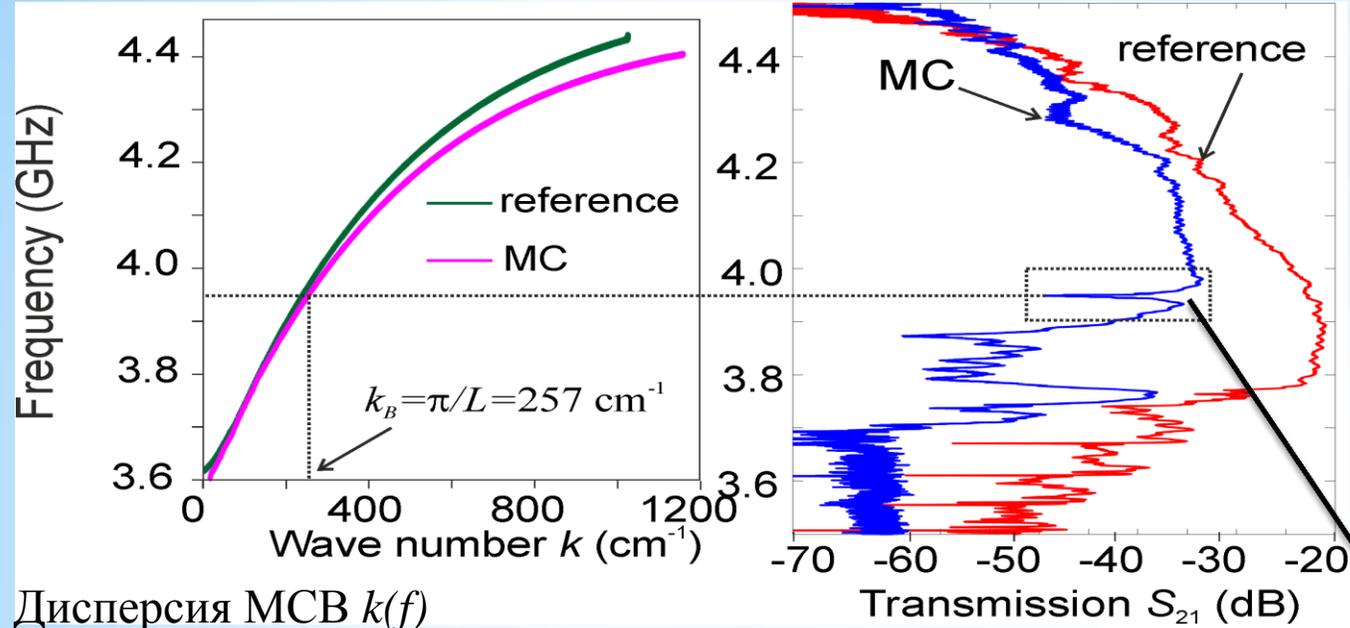


$4\pi M_0 = 1750 \text{ Гс}$ (намагниченность насыщения)
 $t = 10 \text{ мкм}$ (Толщина плёнки ЖИГ)
 $E = -12.5 \dots 12.5 \text{ кВ/см}$ (электрическое поле в PZT)



(a) Распределение потенциала прикладываемого к электродам, в случае $E = \pm 12.5$ кВ/см .

(b) Распределение компоненты тензора упругих деформаций S_{xx} в случае приложения внешнего электрического поля к пьезоэлектрическому слою $E = \pm 12.5$



Коэффициенты передачи S_{21} референсного магнитного микроволновода шириной 760 мкм и магнонного кристалла, полученные с помощью векторного анализатора цепей

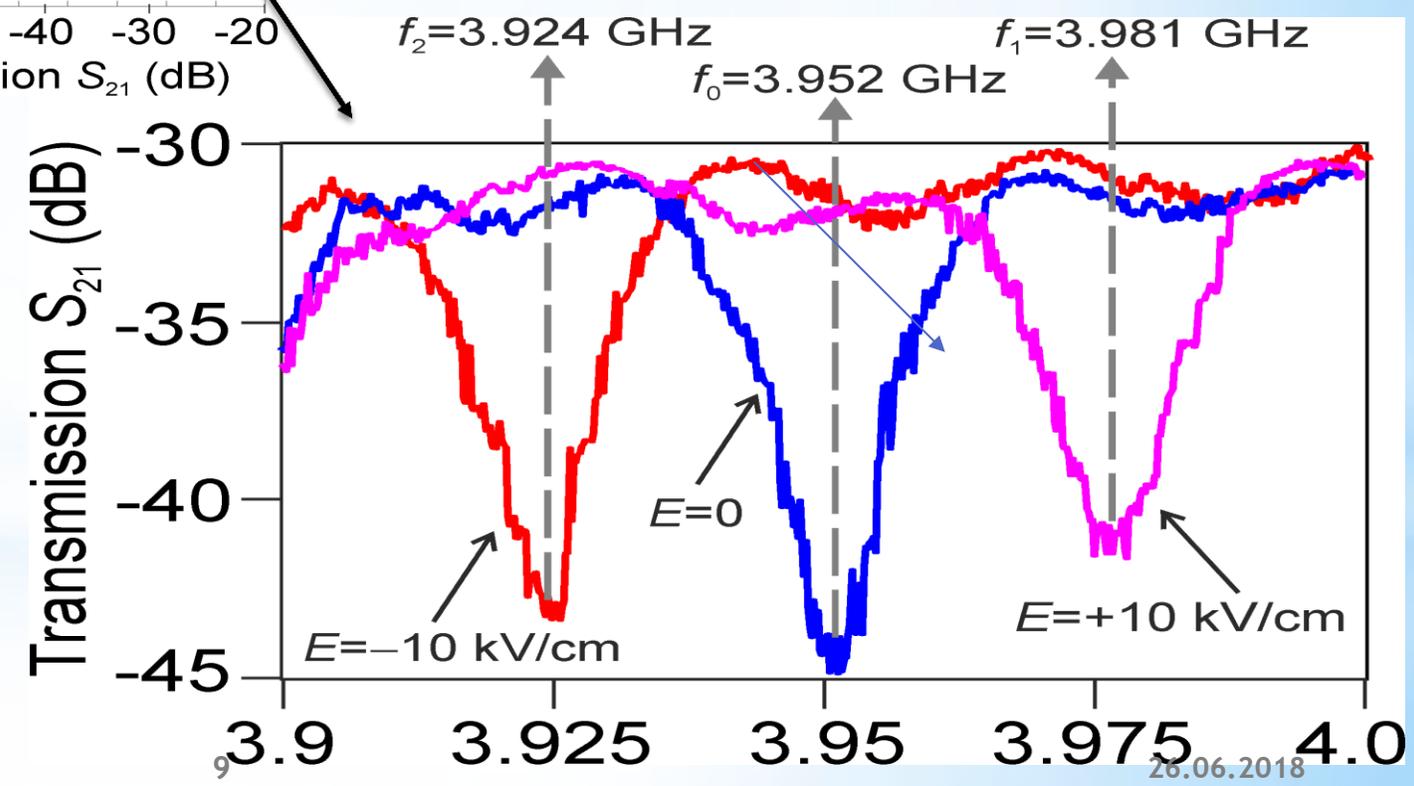
Дисперсия МСВ $k(f)$

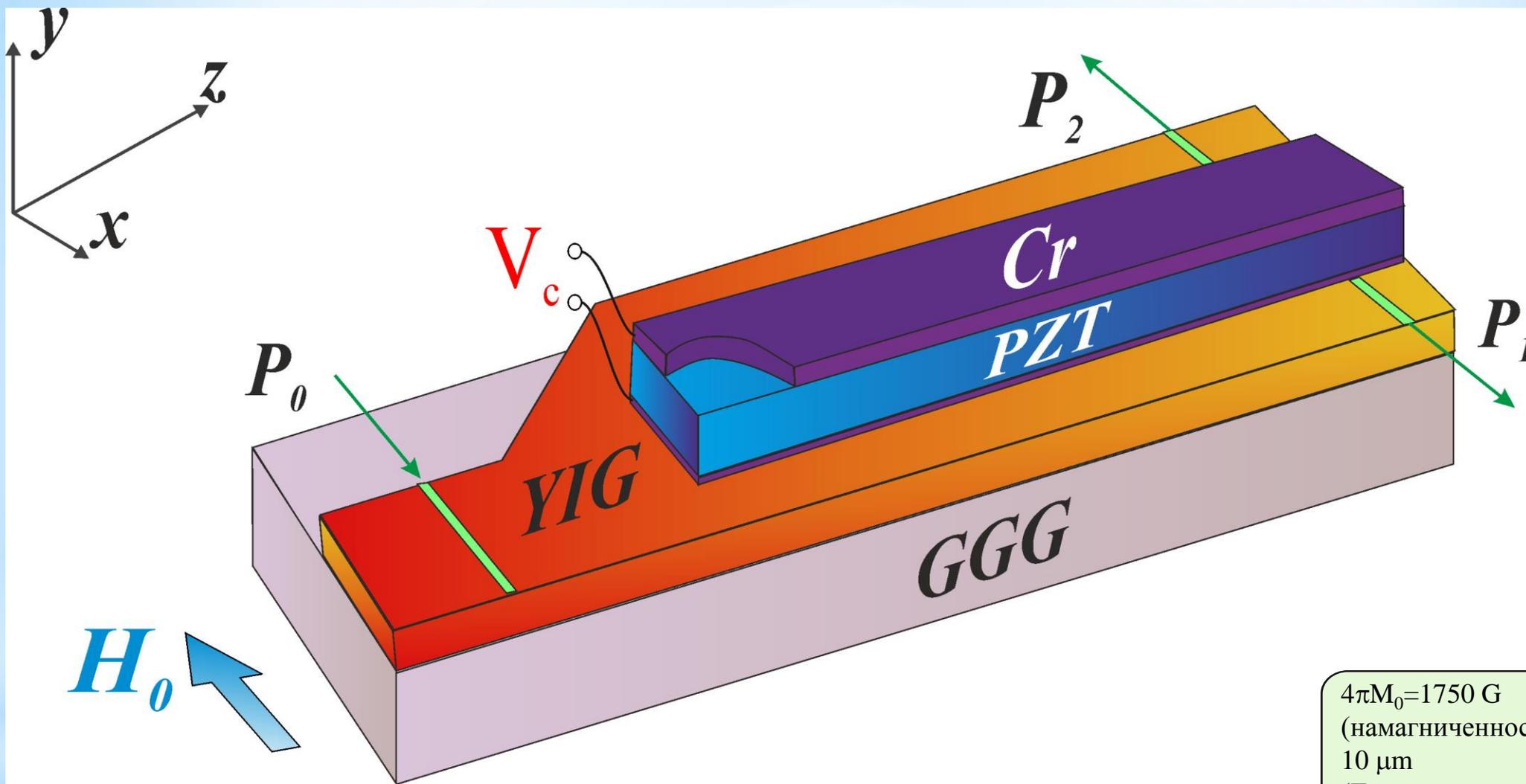
$$k(f) = \varphi(f) / h$$

где $\varphi(f)$ сдвиг фазы,

h – расстояние между микропосками

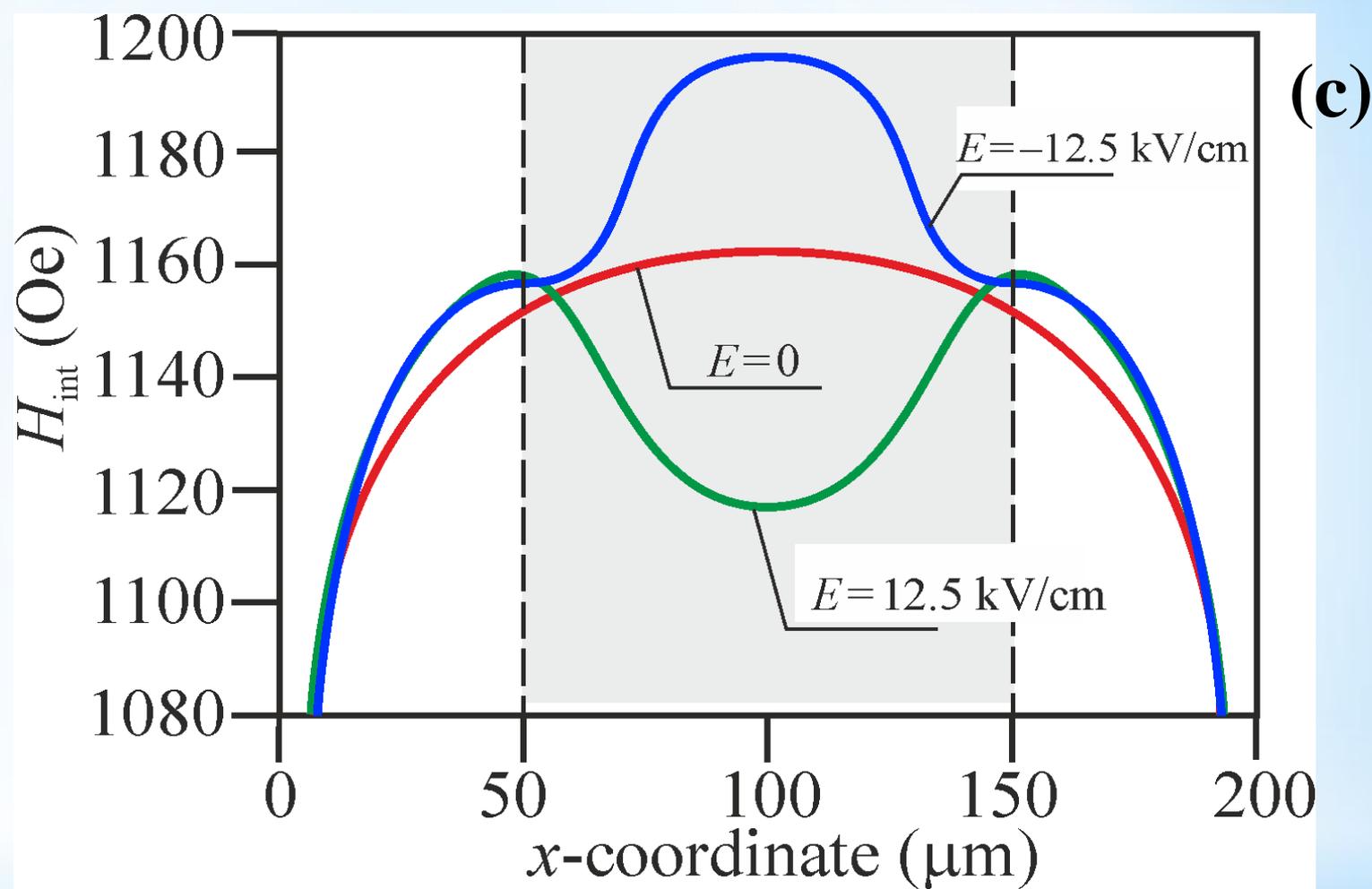
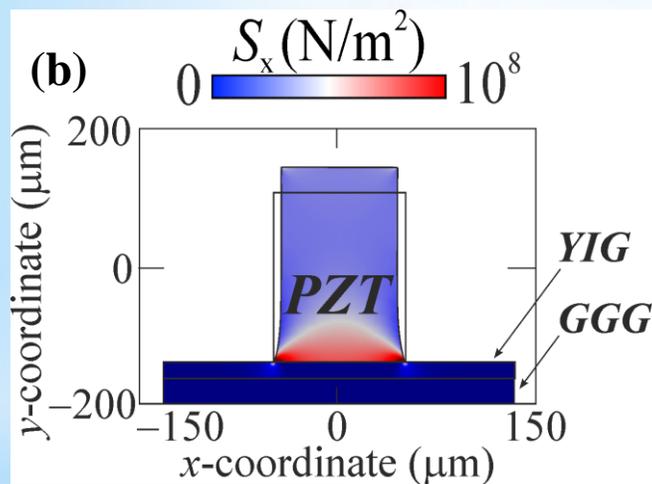
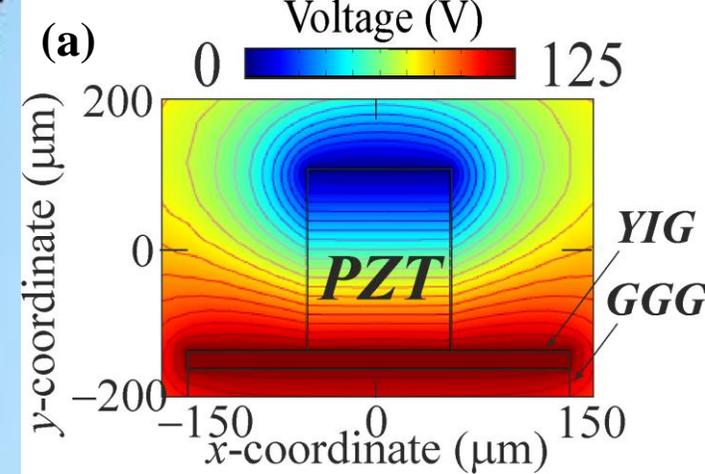
Коэффициент передачи S_{21} магнонного кристалла в частотной области запрещённой зоны. Частотный сдвиг запрещённой зоны может быть как положительным (если $E > 0$), так и отрицательным (если $E < 0$).



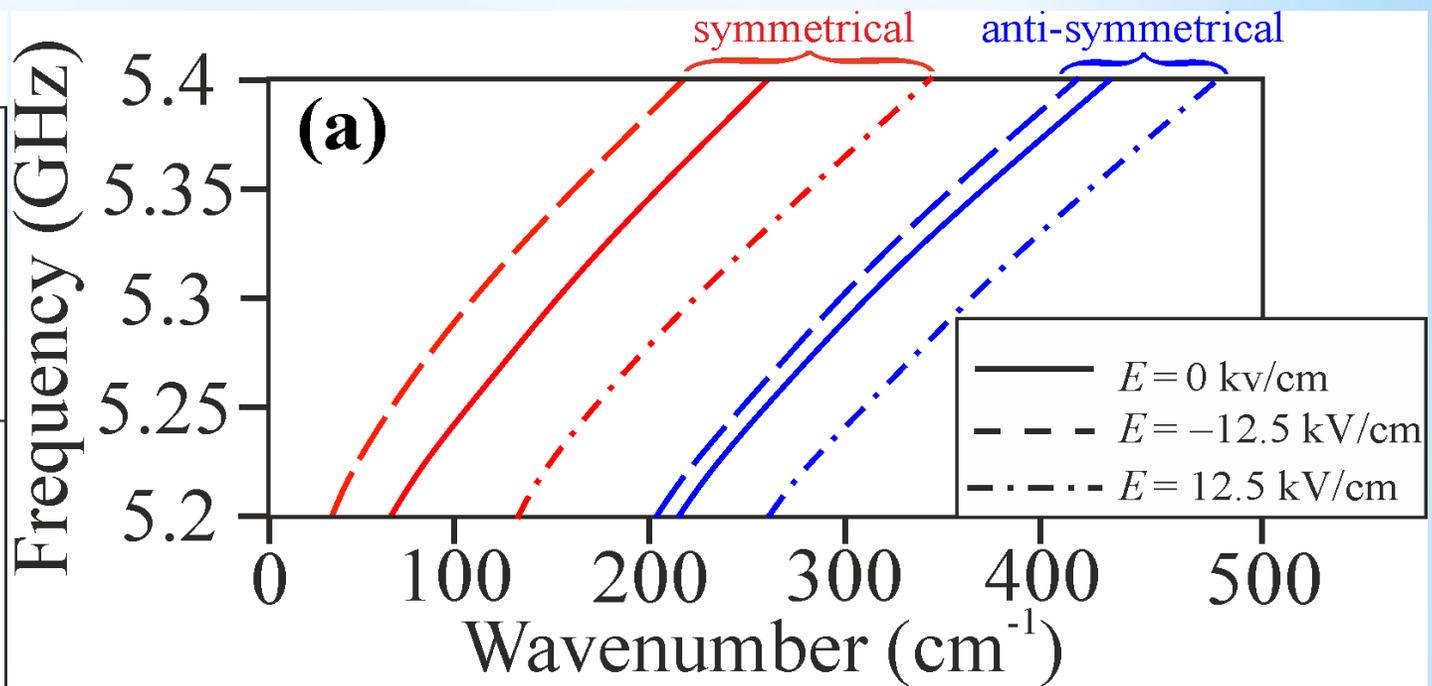
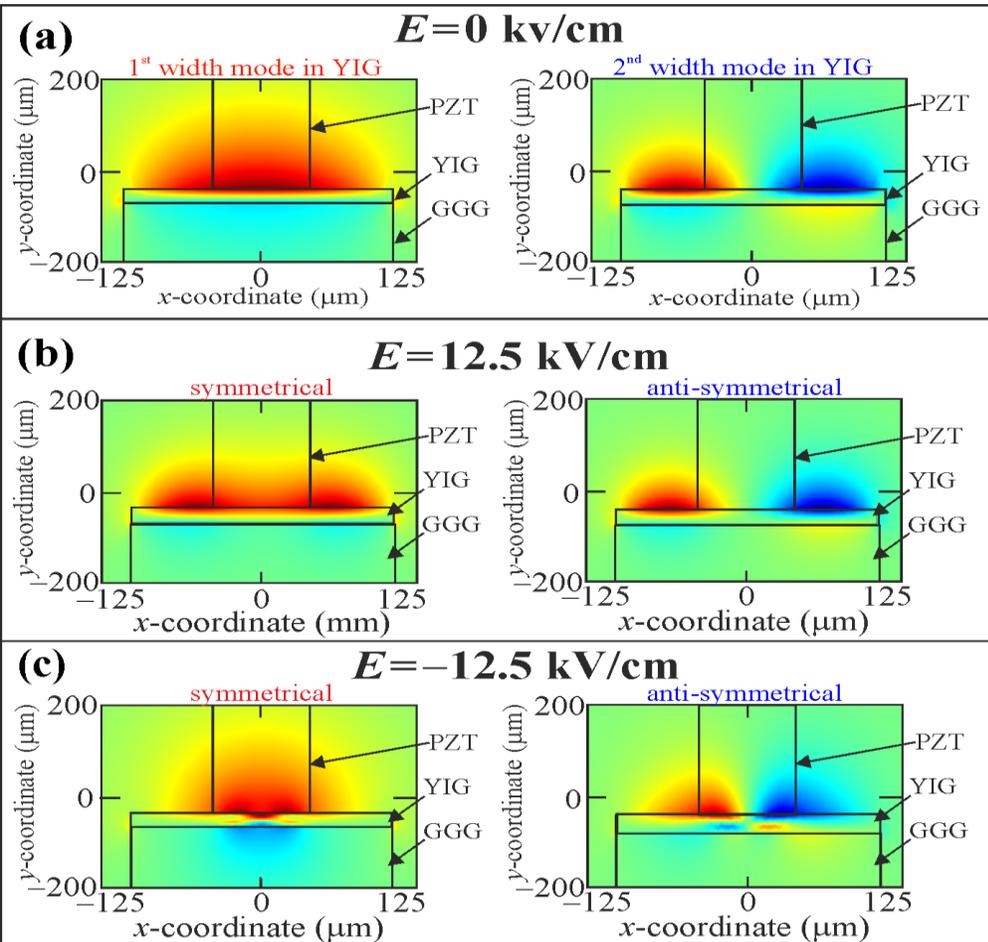
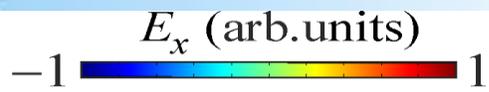


$4\pi M_0 = 1750 \text{ G}$
 (намагниченность насыщения)
 $10 \mu\text{m}$
 (Толщина плёнки ЖИГ)
 $H_0 = 1200 \text{ Oe}$
 (Внешнее магнитное поле)
 $E = -12.5 \dots 12.5 \text{ kV/cm}$
 (электрическое поле в PZT)

26.06.2018

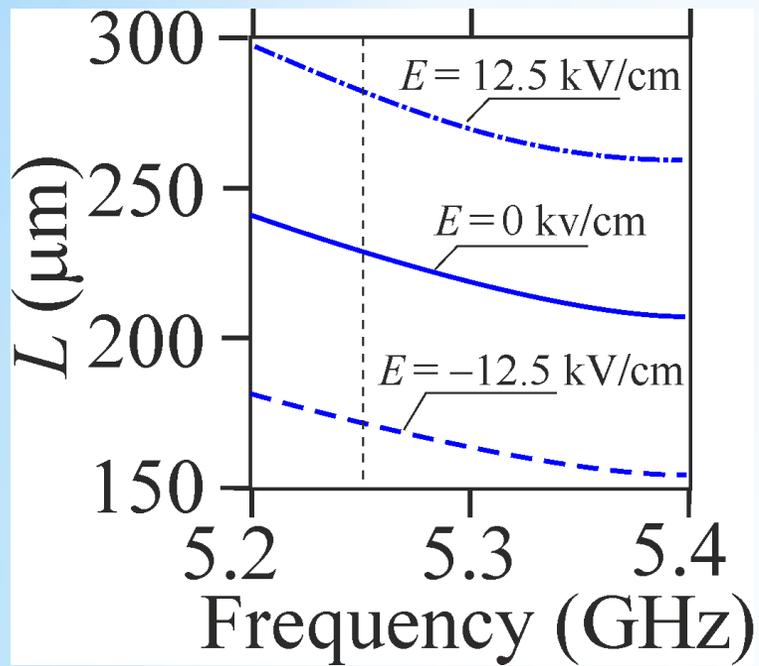


- (a) Распределение электрического потенциала при приложении к электроду напряжения 125 В
- (b) Распределение компоненты тензора упругих деформаций S_x в случае приложения внешнего электрического поля к пьезоэлектрическому слою.
- (c) Профили внутреннего магнитного поля ЖИГ-микроволновода в случае приложения напряжения к электроду.

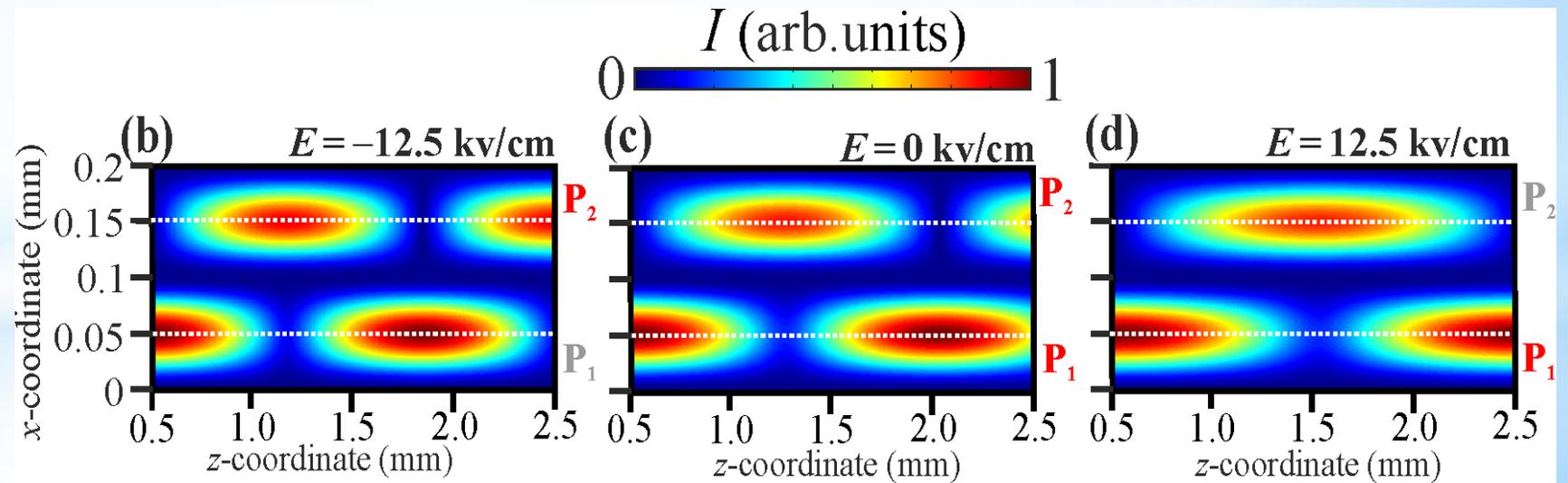
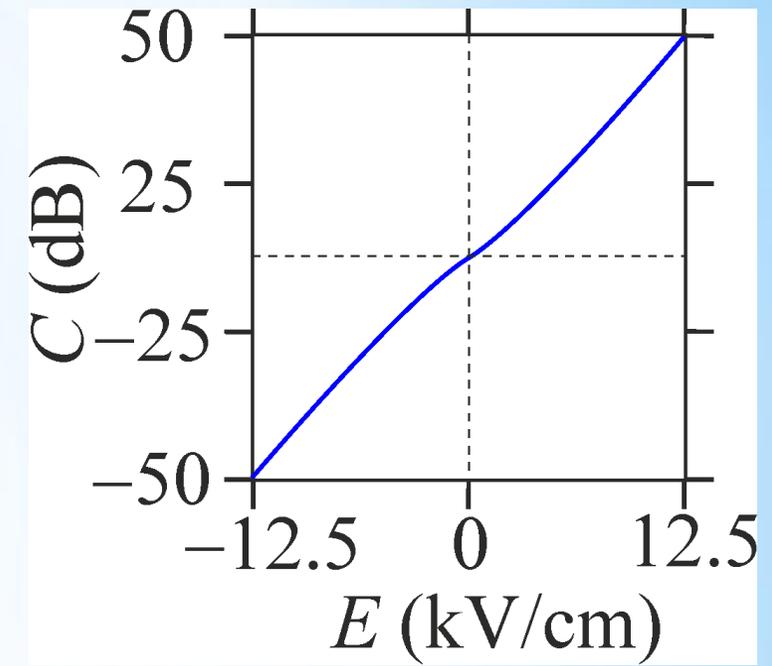


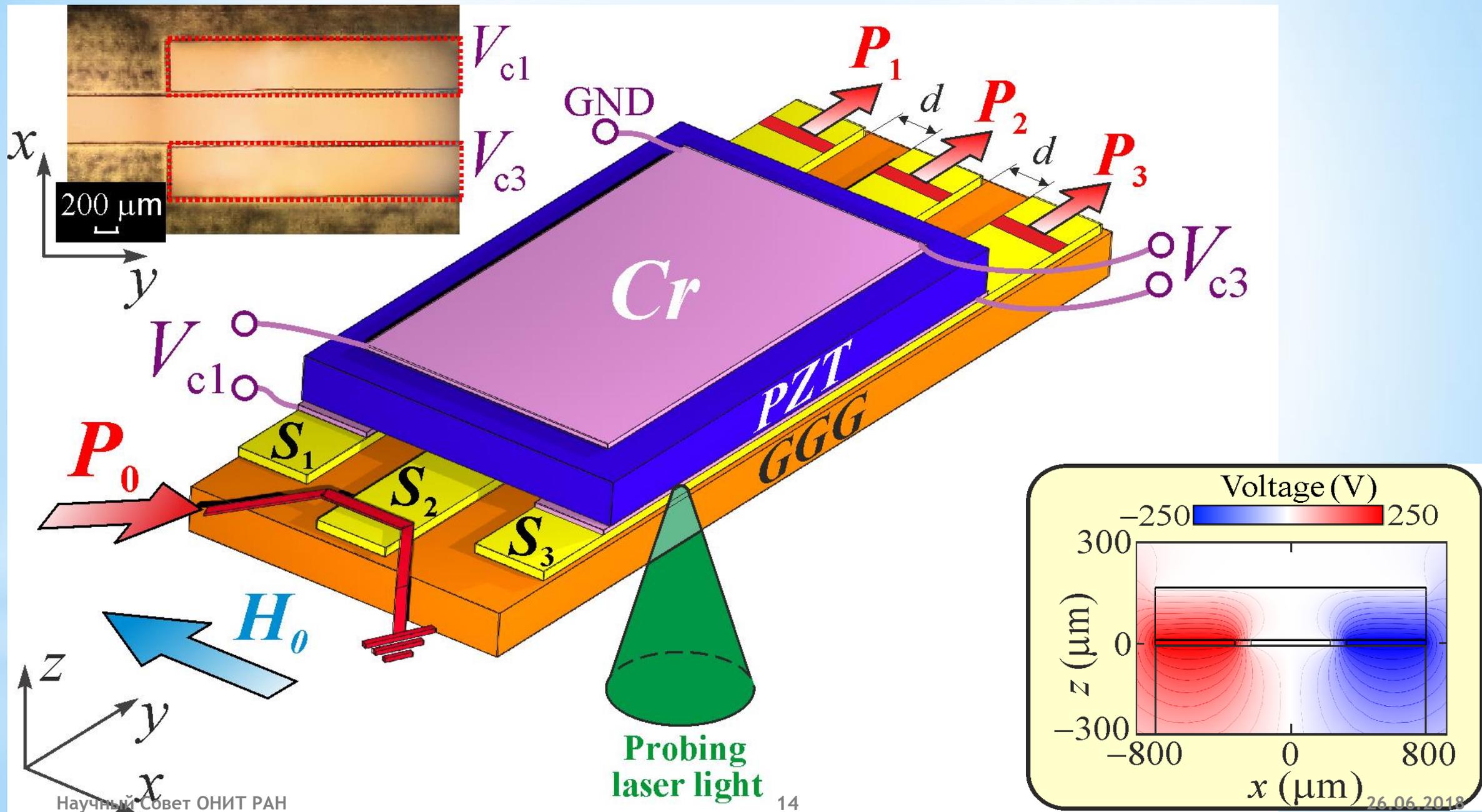
Дисперсионные характеристики для первой и второй мод ЖИГ-микроволновода в случае изменения величины внешнего электрического поля

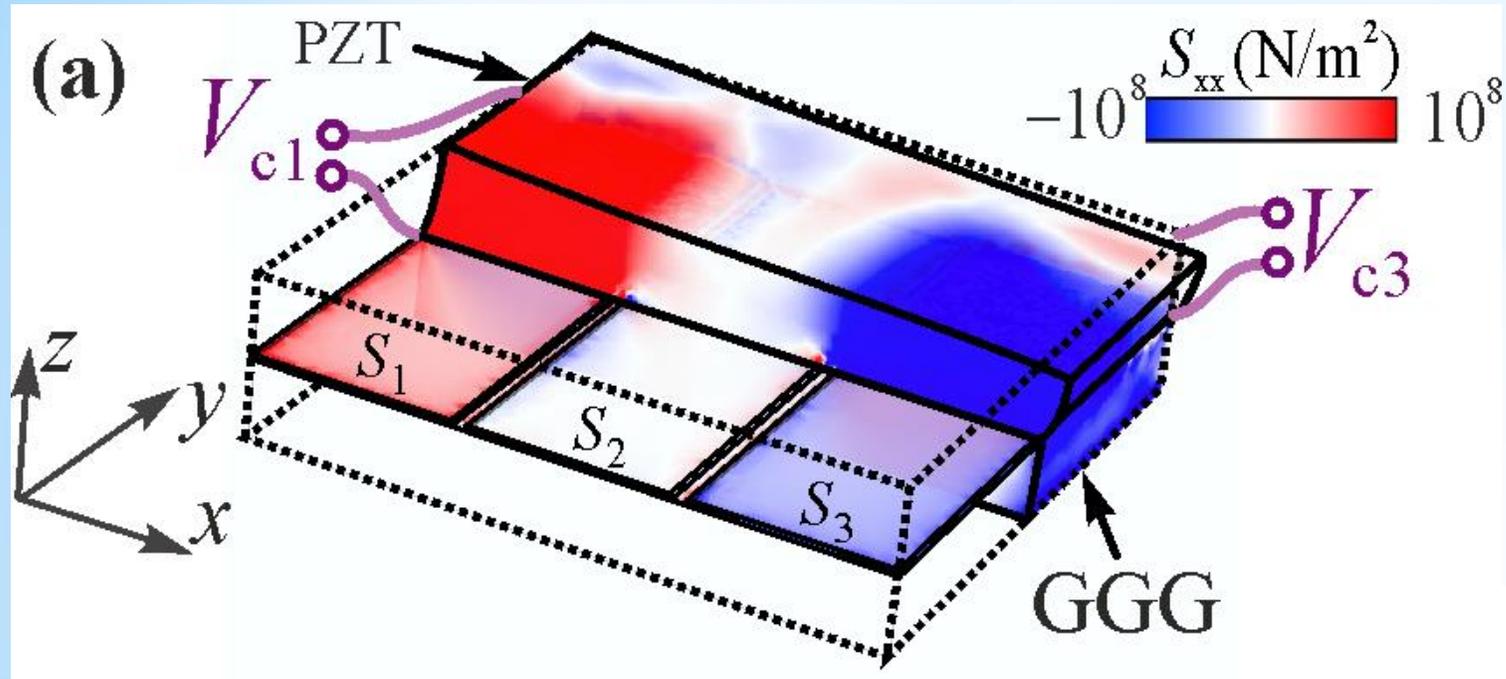
Распределение компоненты E_x электрического поля для первой и второй низших мод одиночного микроволновода и симметричной и антисимметричной низших мод слоистой структуры ЖИГ-пьезоэлектрика в случае, когда $E = \pm 12.5$ кВ/см.



Частотная зависимость длины связи при изменении величины внешнего электрического поля (Слева). Коэффициент C как функция электрического поля (Справа).

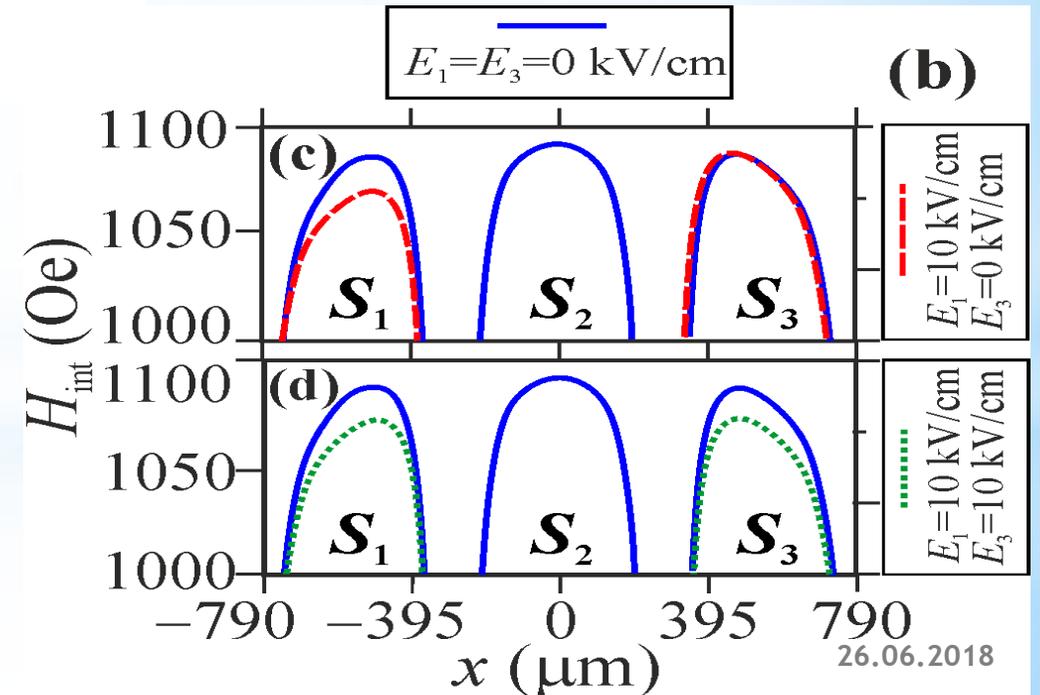


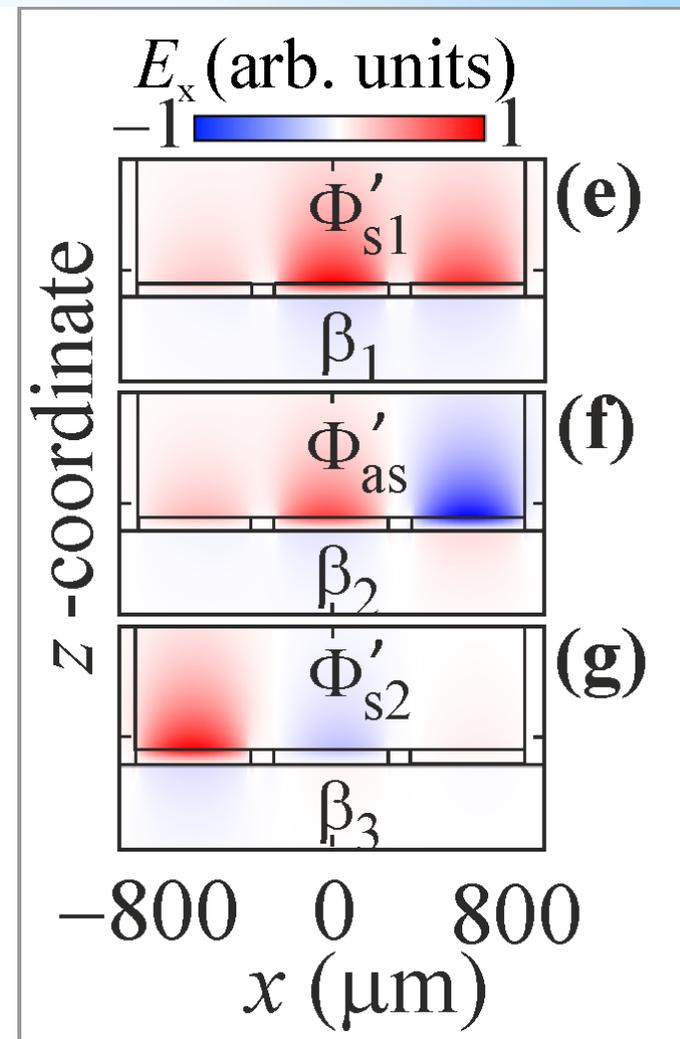
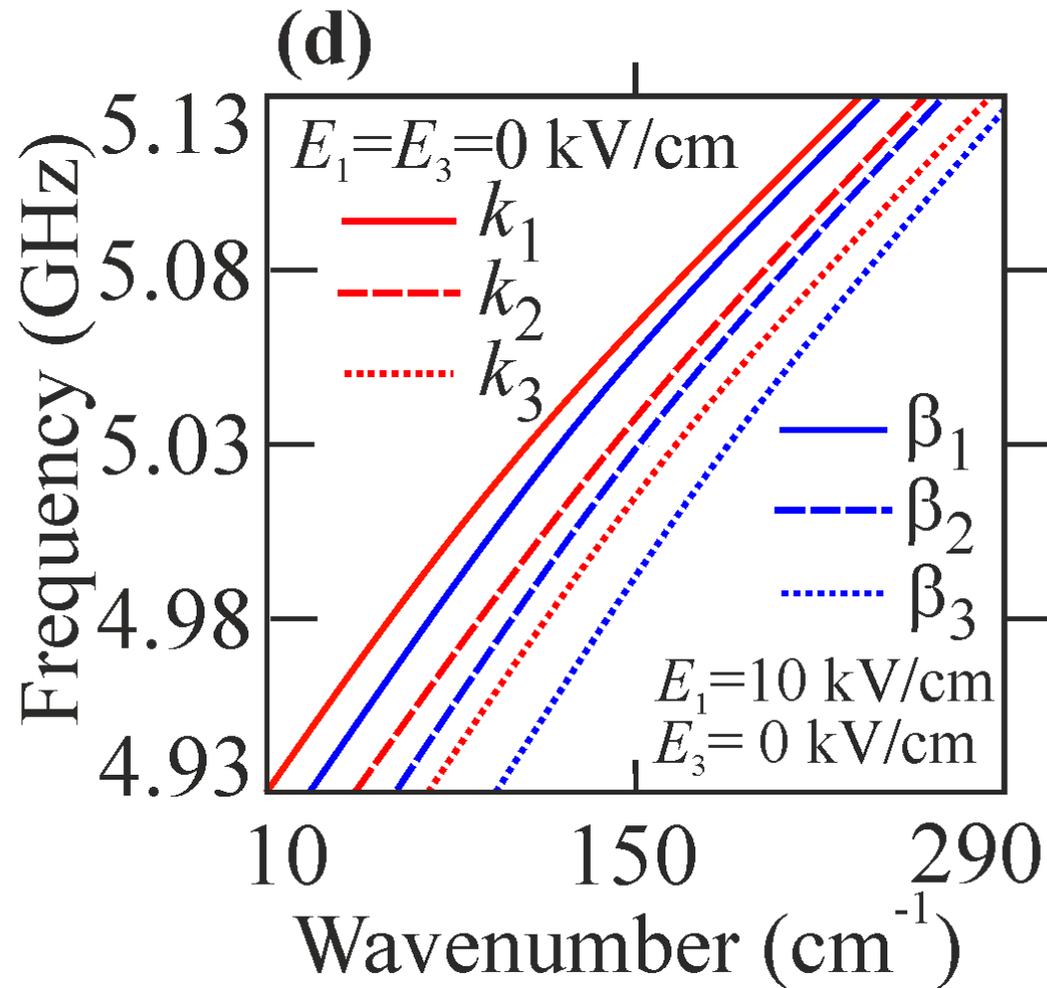
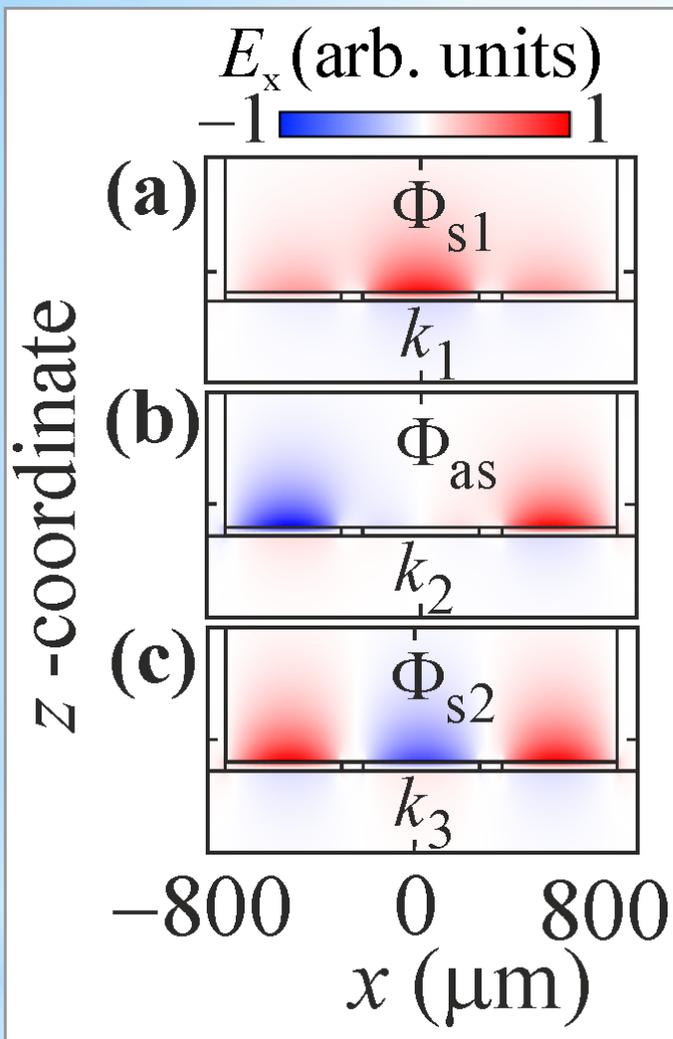




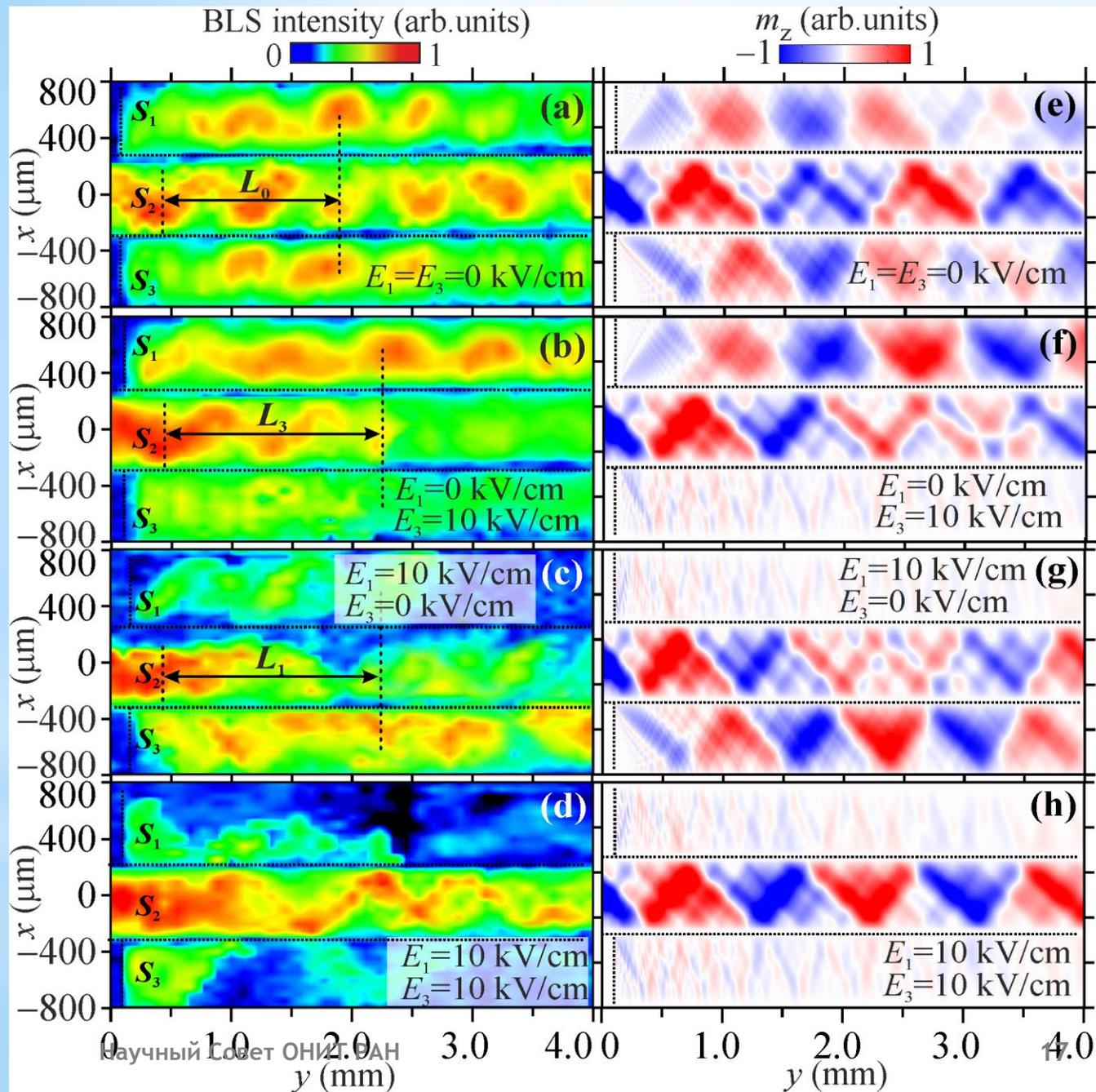
(a) Распределение компоненты тензора упругих деформаций S_{xx} в случае приложения внешнего электрического поля $E = \pm 12.5$ кВ/см к пьезоэлектрическому слою.

(b) Профили внутреннего магнитного поля в случае положительных (красные кривые) и нулевых значений (синие кривые) электрического поля.

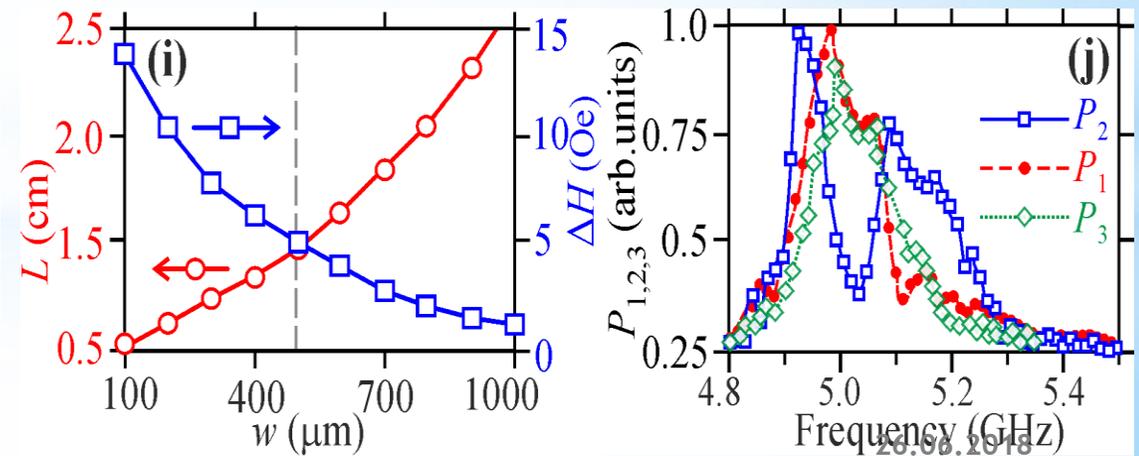


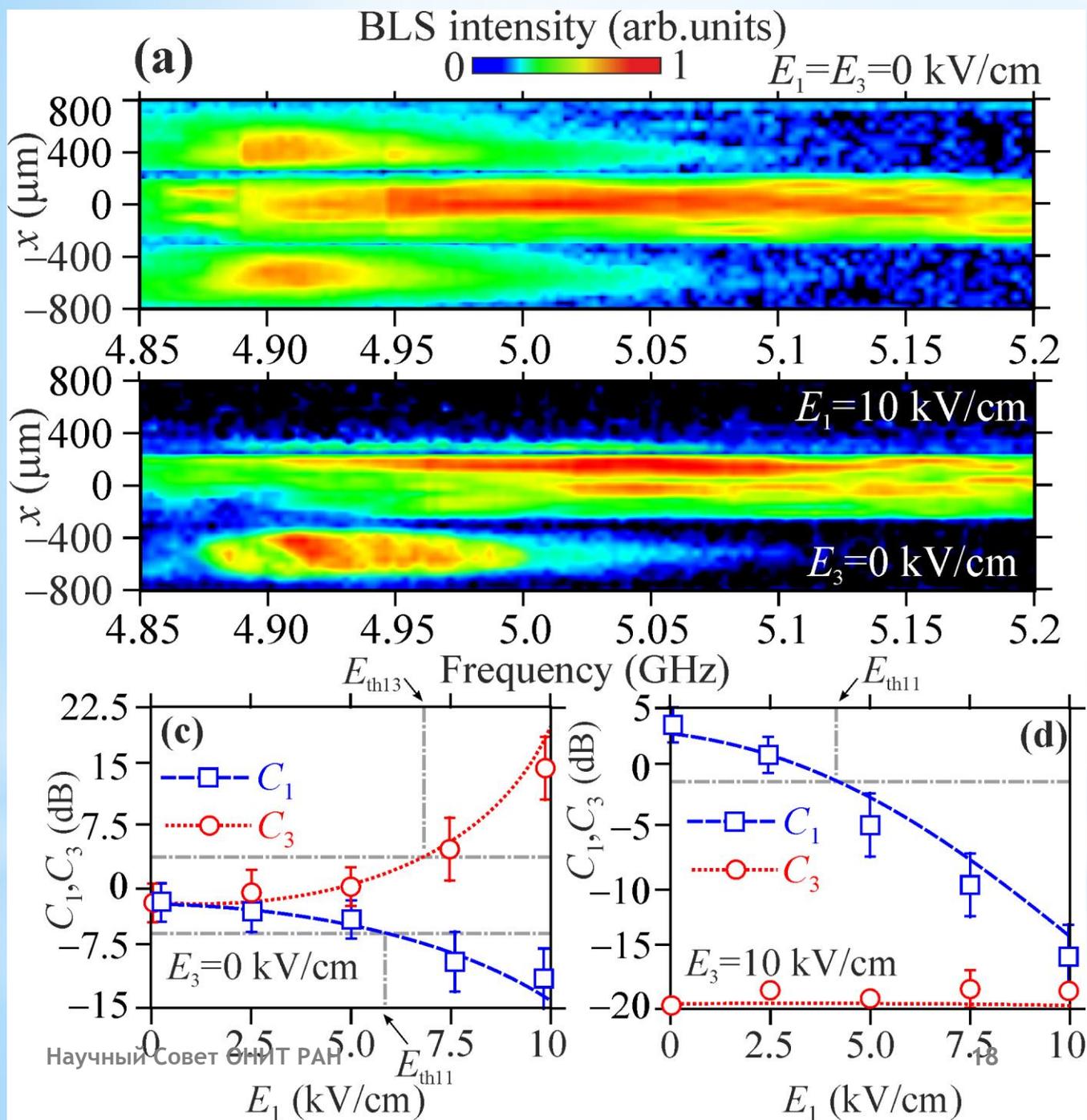


(a)–(c) Спектр собственных мод латеральной структуры в случае $E_1 = E_3 = 0$ кВ/см. (d) Дисперсия двух симметричных и антисимметричной мод, в случае $E_1 = E_3 = 0$ кВ/см (красные кривые) и $E_1 = 10$ кВ/см и $E_3 = 0$ кВ/см (синие кривые). (e)–(g) Спектр собственных мод латеральной структуры в случае $E_1 = E_3 = 10$ кВ/см.



(a)–(d) BLS-интенсивность спиновой волны на частоте $f_1 = 4.925$ ГГц в случае приложения внешнего электрического поля (значения обозначены на рисунке); (c)–(h) Результаты расчета пространственного распределения компоненты динамической намагниченности для частоты входного сигнала $f_1 = 4.925$ ГГц. (i) Рассчитанная длина связи и разность внутреннего магнитного поля в зависимости от ширины микроволноводов. (j) Частотная зависимость выходного сигнала P_1 , P_2 , и P_3 в микроволноводах S_1 , S_2 , и S_3 , соответственно. Все показанные результаты были получены при величине внешнего магнитного поля $H_0 = 1100$ Э.





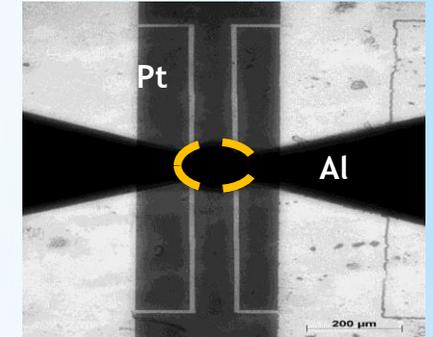
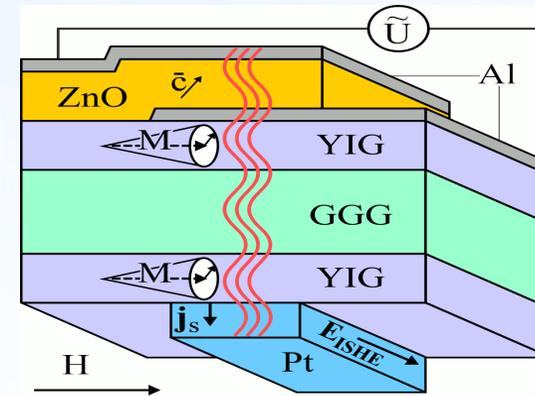
Частотная зависимость BLS-сигнала во всех трёх микроволноводах при $E_1 = E_3 = 0$ кВ/см (а) и $E_1 = 10$ кВ/см, $E_3 = 0$ кВ/см. (с) и (d) демонстрирующие величину коэффициентов $C_{1,3}$ в зависимости от E_1 в случае, когда $E_3 = 0$ кВ/см и $E_3 = 10$ кВ/см, соответственно.

Акустическая спиновая накачка

в магнитоэлектрических резонаторах на объемных акустических волнах (НВАР) для устройств микроволновой спинтроники (фононная спинтроника)

AIP Advances 8, 056128 (2018)

- Впервые наблюдалось возбуждение и детектирование спиновых волн (СВ) и спиновых токов (СТ) в **НВАР** со структурой Al/ZnO/Al – ЖИГ/ ГГГ/ ЖИГ– Pt в широком диапазоне резонансных частот и полей. Впервые наблюдалась величина напряжения обратного спинового эффекта Холла (ISHE) в мкВ диапазоне: $V_{ISHE} \sim 4$ мкВ (Рис.2) при подаваемой на электроды пьезо-преобразователя мощности ~ 2 мВт и активной области возбуждения ~ 170 мкм.



Преимущества АСН в НВАР

- пьезоэлектрическое возбуждение СВ не требует создания rf магнитных полей → снижаются омические потери и энергопотребление.
- **НВАР**: эффективное возбуждение гиперзвука (строго определённой поляризации) на резонансных частотах с $Q \sim 10000$ → эффективно накапливает другую энергию для передачи ее в магнитную подсистему при магнитном поле, соответствующем магнитоупругому резонансу (MER).

Рис.1. Магнитоэлектрический НВАР, для акустической спиновой накачки (АСН): схема и микрофотография на просвет.

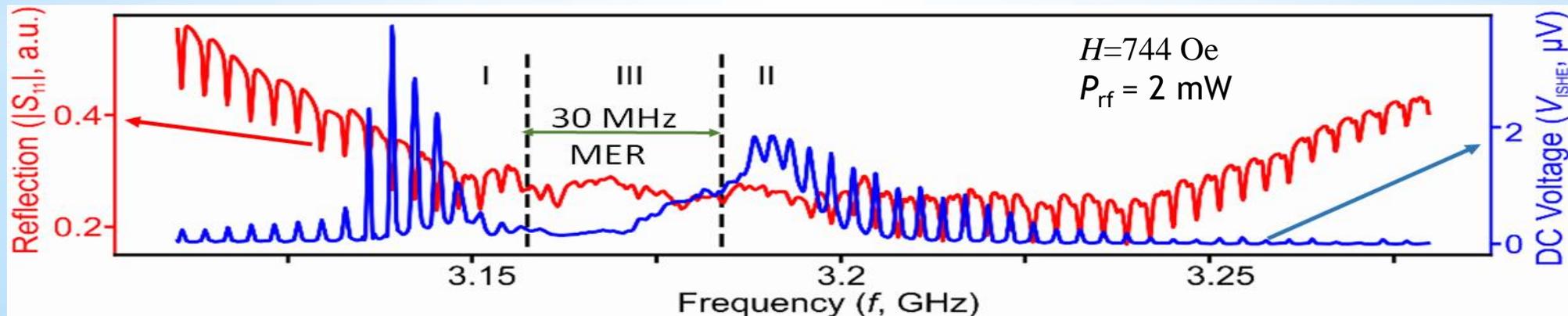


Рис.2. Частотная зависимость dc V_{ISHE} на Pt (синяя кр.) и модуль коэффициента отражения резонатора (красная кр.)

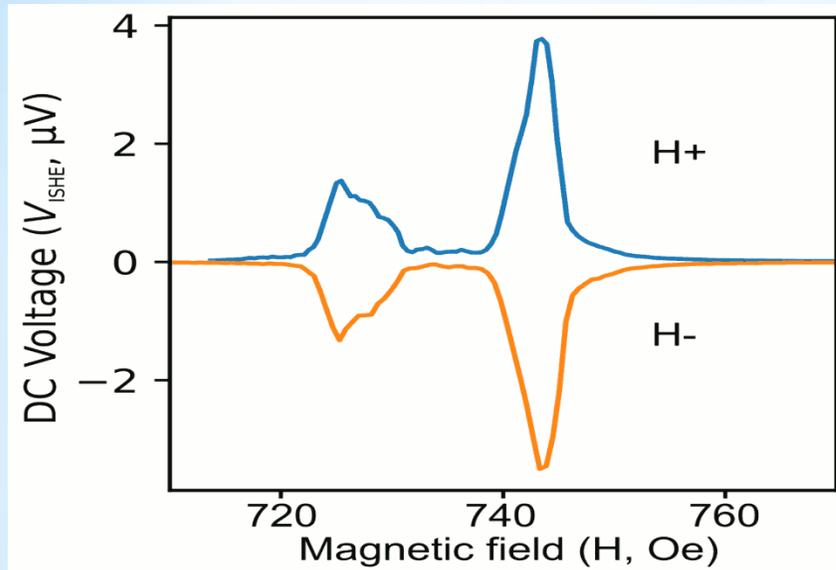


Рис.3. Зависимость напряжения от магнитного поля при возбуждении резонатора на частоте одного из максимумов Рис. 2. ($f_n = 3.1385$). Нижняя кривая снята при смене направления магнитного поля.

- Измерения при инвертированном направлении магнитного поля показали, что напряжение меняет знак, но не меняет свою величину при заданной величине поле. Это подтверждает, что детектирования СТ в платине происходит в результате ISHE – конвертации чисто спинового тока в ток проводимости.

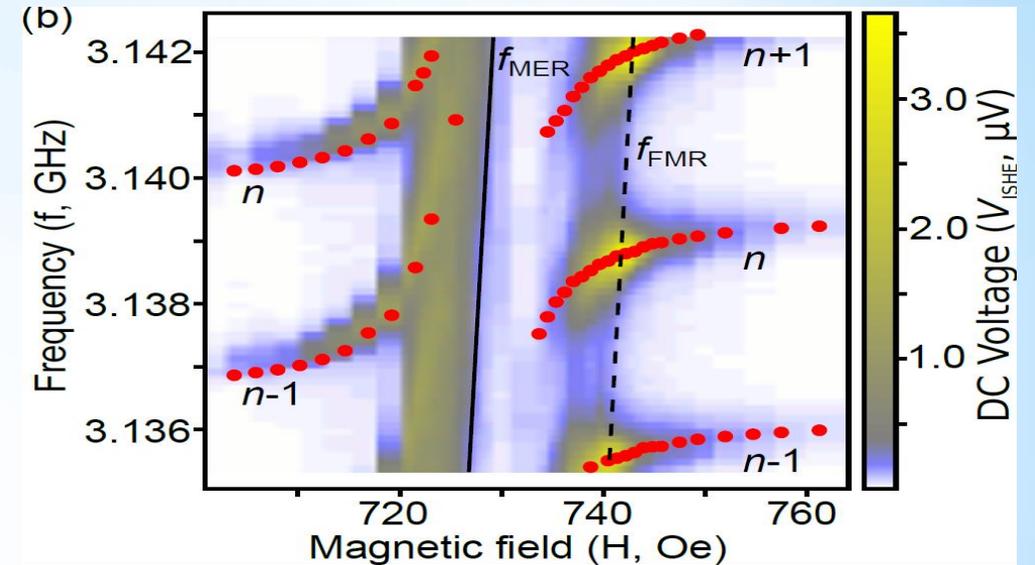


Рис.4. Зависимость напряжения от поля и частоты (правая шкала) и изменение трех соседних частот резонансных частот НВАР (красные точки)

- Частотные и полевые зависимости $V_{ISHE}(f, H)$, демонстрируют полное соответствие между локализацией максимумов напряжения и положением резонансных частот в плоскости (f, H) .

Т.о., вся совокупность приведенных и других данных подтверждает, что наблюдаемые эффекты связаны с магнитоупругим возбуждением спиновых волн и акустической спиновой накачкой из ЖИГ в платину, детектируемой в пленке Pt за счет обратного спинового эффекта Холла.

- * Создается новое направление в магнетизме и электронике
- * Развивается элементная база
- * Есть потребность в новых композиционных материалах и структурах

* **Выводы**