



НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОНКИХ ПЛЕНОК И НАНОСТРУКТУР ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

- Увеличение плотности элементов (до Тбит/см²)
- Уменьшение поперечного размера активных элементов

Повышение качества материалов

Тонкие пленки

- Параметры доменной структуры
- Динамика переключения поляризации
- Размерные эффекты

Наноструктуры

- Технологии изготовления новых типов наноструктур
- Диагностика сегнетоэлектрических свойств наноструктур

Создание эффективных неразрушающих методик экспериментального исследования параметров сегнетоэлектрических пленок и наноструктур, используемых в устройствах микро- и наноэлектроники.

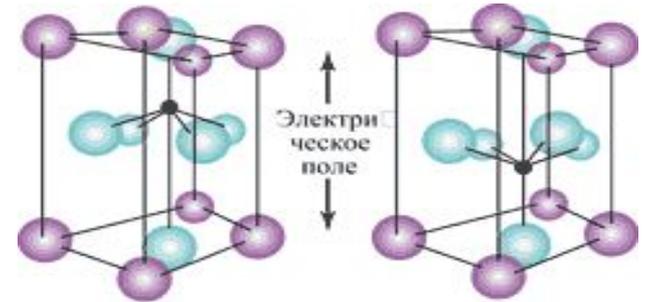
МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ СЭ МАТЕРИАЛОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Рентгеноструктурный анализ
Электронная микроскопия
Сканирующая зондовая микроскопия

Эллипсометрия
Рамановская спектроскопия
Люминесценция

Применение СЭ материалов в микроэлектронике

FRAM *Ferroelectric Random Access Memory*

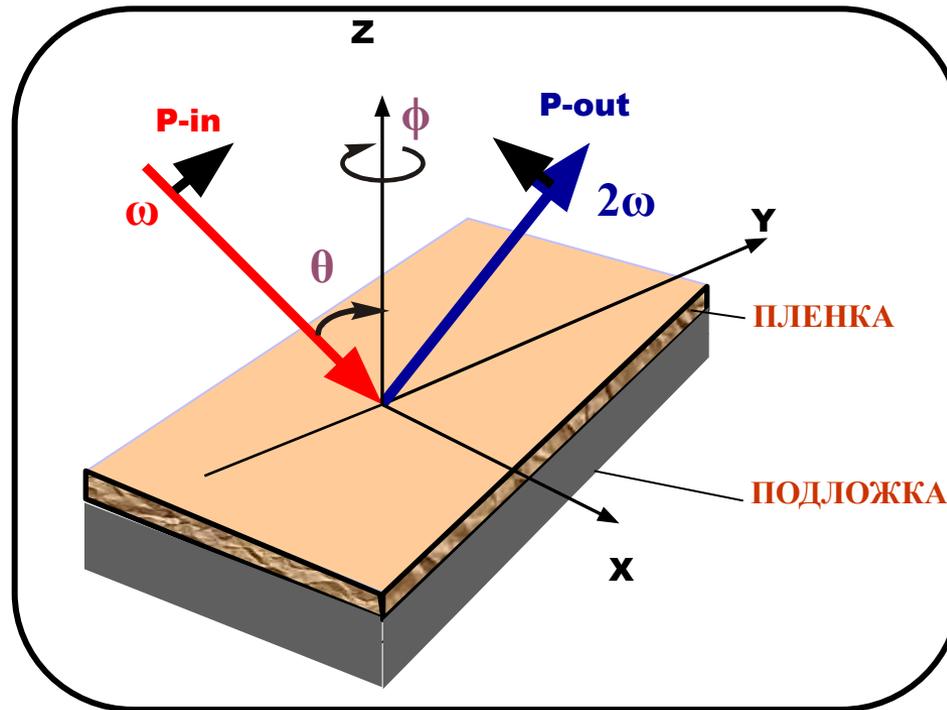


время хранения информации
– более 10 лет

10^{10} циклов считывания/записи

- Электрооптические модуляторы
- Конденсаторы
- Фазовращатели
- Частотные фильтры
- Оптические процессоры
- Микроактюаторы

ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ГАРМОНИКИ: БАЗОВЫЙ ФОРМАЛИЗМ



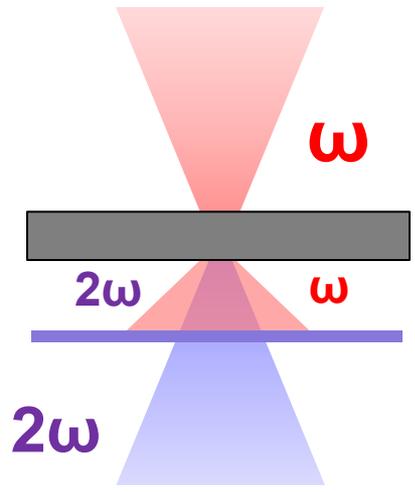
$$P_i(2\omega) = \chi_{ijk}^{(2)} E_j(\omega) E_k(\omega)$$

в центросимметричной
(неполярной) среде

$$\chi_{ijk}^{(2)} = 0$$

- Симметрия
- Свойства поверхностей и границ раздела
- Объемные и поверхностные фазовые переходы
- Параметры доменной структуры

Методика генерации второй гармоники



ED: $\begin{pmatrix} \chi \\ P^{NL} \end{pmatrix}^{(2\omega)}$

MD: $\begin{pmatrix} \chi \\ M^{NL} \end{pmatrix}^{(2\omega)}$

Qadr: $\begin{pmatrix} \chi \\ Q^{NL} \end{pmatrix}^{(2\omega)}$

$$\propto \begin{pmatrix} \hat{\chi}^{eee} & \hat{\chi}^{eem} & \hat{\chi}^{emm} \\ \hat{\chi}^{mee} & \hat{\chi}^{mem} & \hat{\chi}^{mmm} \\ \hat{\chi}^{qee} & \hat{\chi}^{qem} & \hat{\chi}^{qmm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \chi \\ EE \\ EH \\ HH \end{pmatrix}^{(\omega)}$$

$$E^{2\omega} \begin{pmatrix} E \\ H \end{pmatrix} = E_0^{2\omega} + \mathfrak{N} \begin{pmatrix} P(E) \\ M(H) \end{pmatrix}$$

наличие
нецентросимметричной среды

$$P_i(2\omega) = \chi_{ijk} E_j(\omega) E_k(\omega)$$

$$P=0 \Rightarrow I^{\Gamma} = 0$$

$$P \neq 0 \Rightarrow I^{\Gamma} \neq 0$$

Эффективная методика при исследовании
переключения поляризации

Вторая гармоника и переключение поляризации

$$I^{2\omega}(E) \propto (E_{bg}^{2\omega})^2 + \xi(P_0 + P(E))^2$$

$$\xi \propto \phi \cdot f\chi^{(0)}P$$

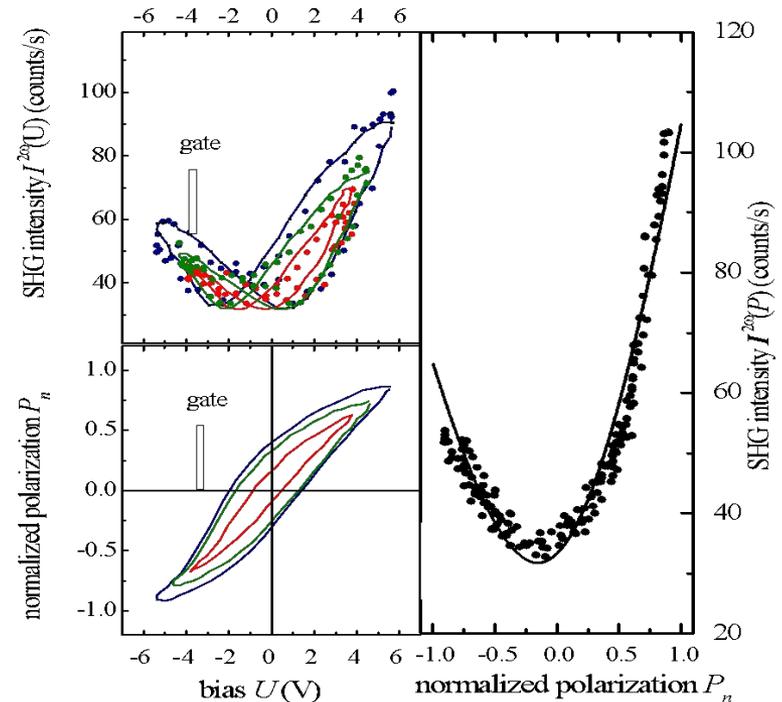
$E_{bg}^{2\omega}$ и P_0 – вклады непереключаемой поляризации;

$P(E)$ – переключаемая СЭ поляризация;

ξ ~ коэффициент пропорциональности, зависящий от факторов Френеля и нелинейной восприимчивости.

В случае, когда $\xi P(E) \gg P_0$, петли симметричны относительно нулевого напряжения. Уменьшение переключаемой части поляризации относительно непереключаемой приводит к асимметризации петли вплоть до вырожденного „квазилинейного“ типа.

Поляризованный сегнетоэлектрик –
Нецентросимметричный материал

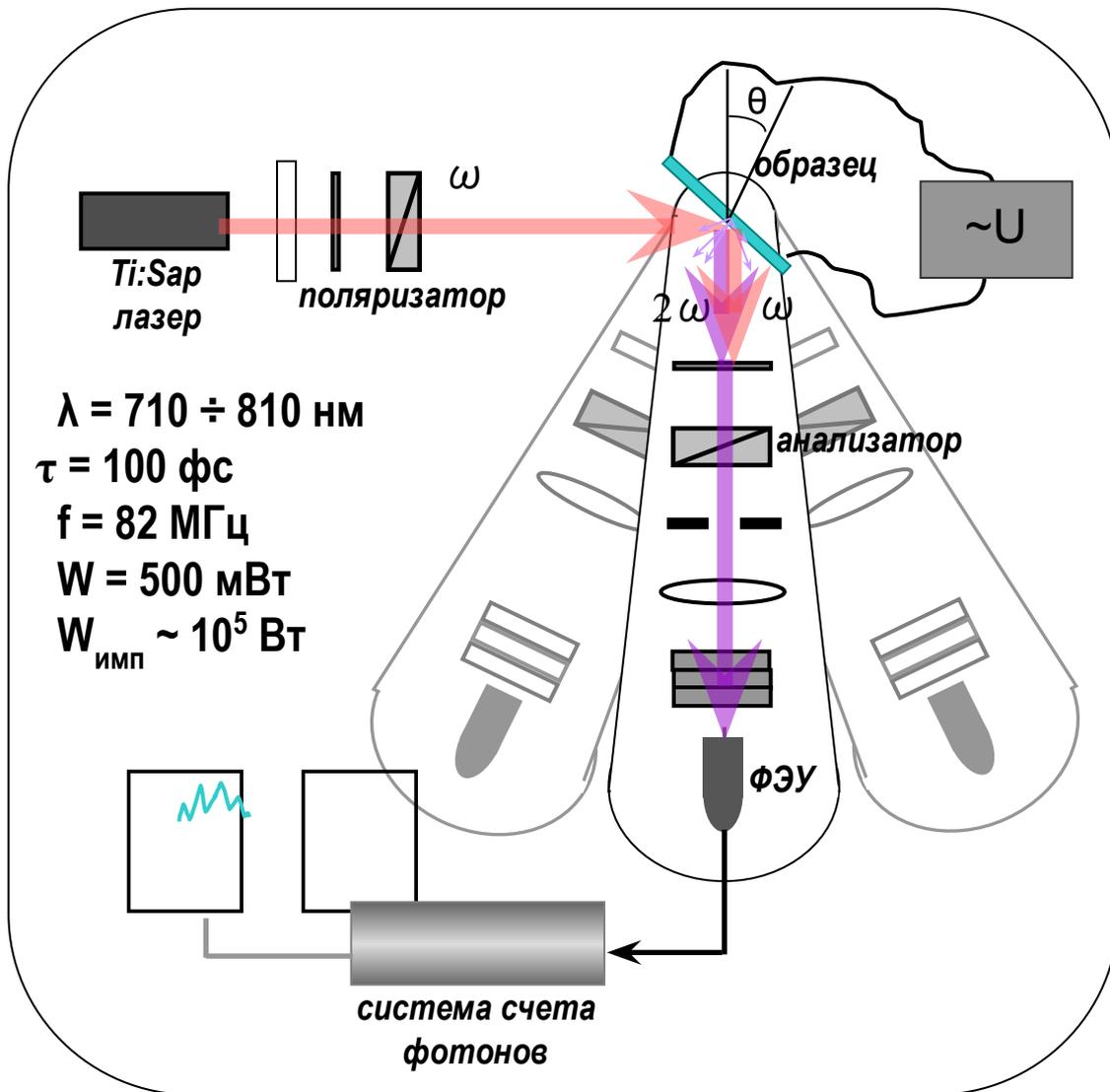


E. D. Mishina, N. E. Sherstyuk, V.I. Stadnichuk, A.S. Sigov, V.M. Mukhorotov, Yu.I. Golovko, A. van Etteger, Th. Rasing, Appl. Phys. Lett. **83**, 2402 (2003)

$$E_{bg}^{2\omega} \neq 0 \quad P_0 \neq 0$$

$$P(E) = -P_0 + \sqrt{\frac{I^{2\omega}(E) - (E_{bg}^{2\omega})^2}{\xi}}$$

БАЗОВАЯ СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА



Эпитаксиальные пленки
 $\text{Ba}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{TiO}_3 @ \text{MgO}(100)$

Метод изготовления –
магнетронное напыление

$$d_f = 6 \div 240 \text{ нм}$$
$$T_c = 15^\circ\text{C}$$

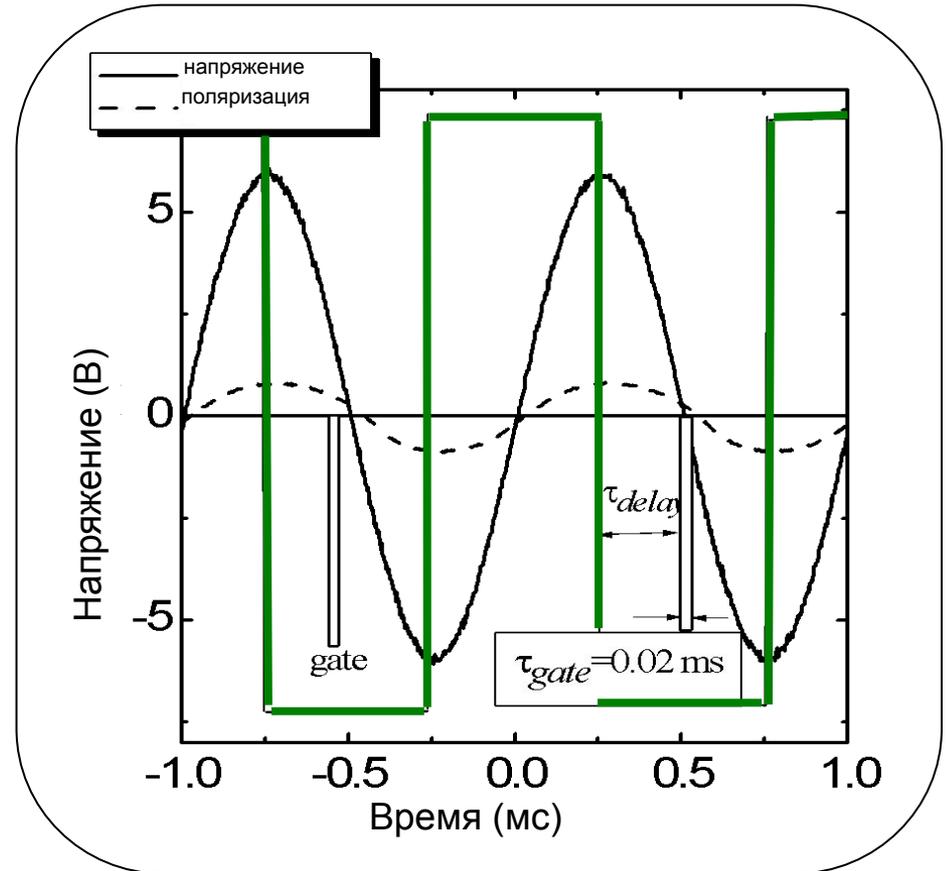
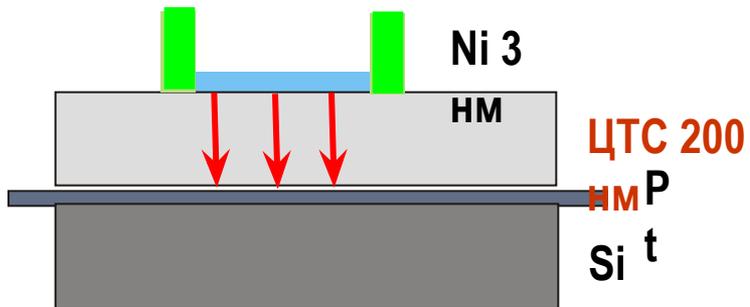
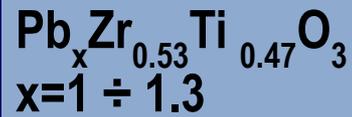
Поликристаллические
пленки



Метод изготовления –
золь-гель

$$d_f = 200 \text{ нм}$$
$$T_o = 650^\circ\text{C}$$

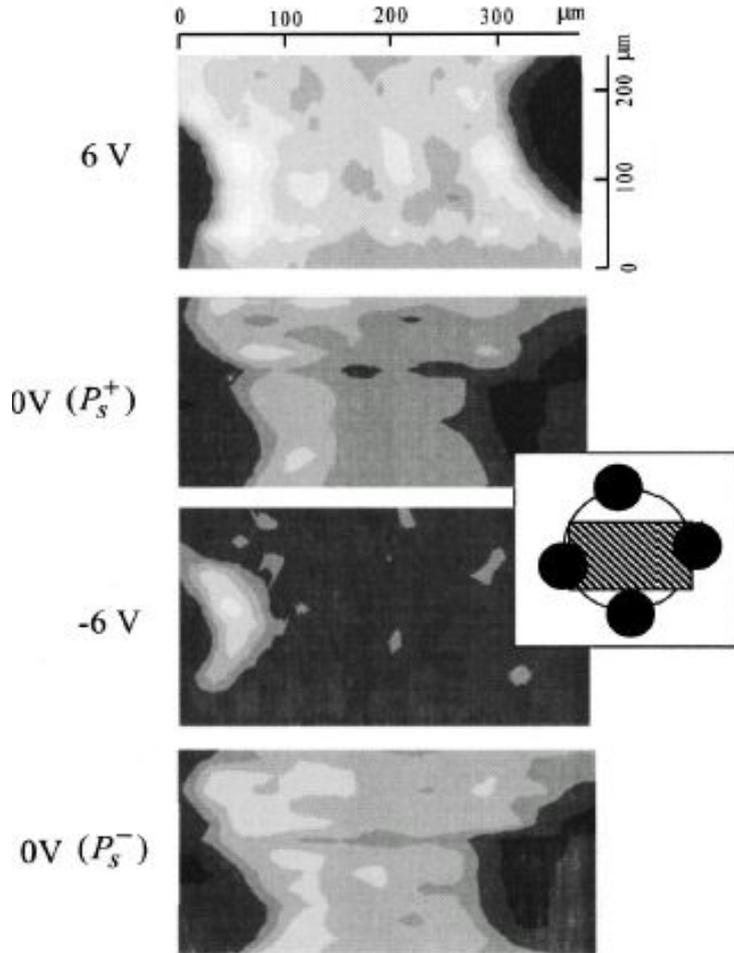
СКАНИРУЮЩАЯ МИКРОСКОПИЯ ВГ



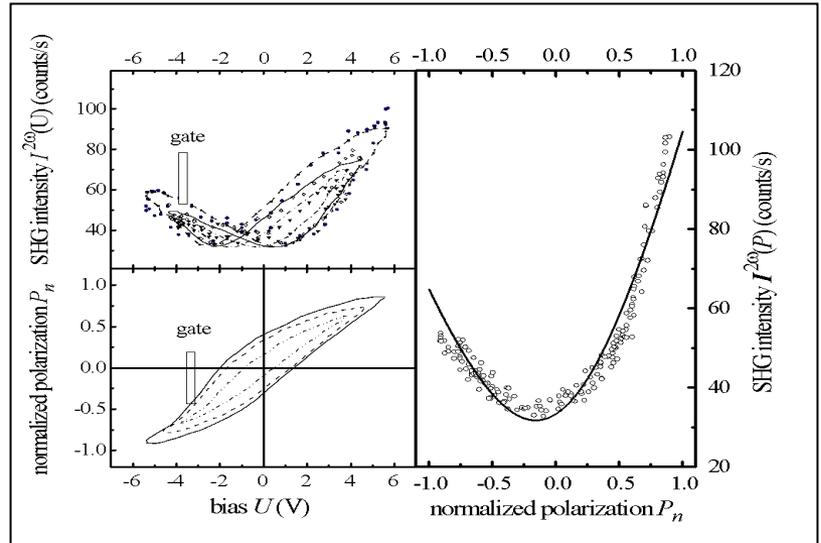
Сигнал ВГ полностью изотропный:
неупорядоченное распределение
микросталлитов в плоскости пленки.

Нанесение полупрозрачного электрода
не повлияло на параметры рассеяния ВГ.

СКАНИРУЮЩАЯ МИКРОСКОПИЯ ВГ

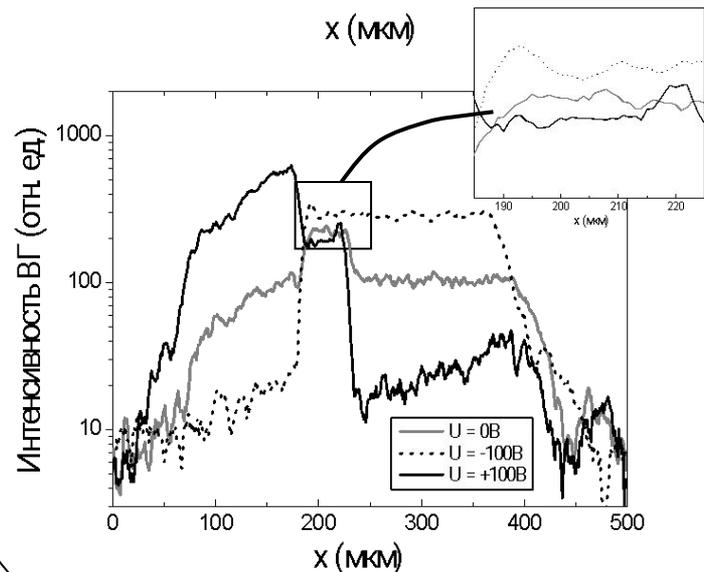
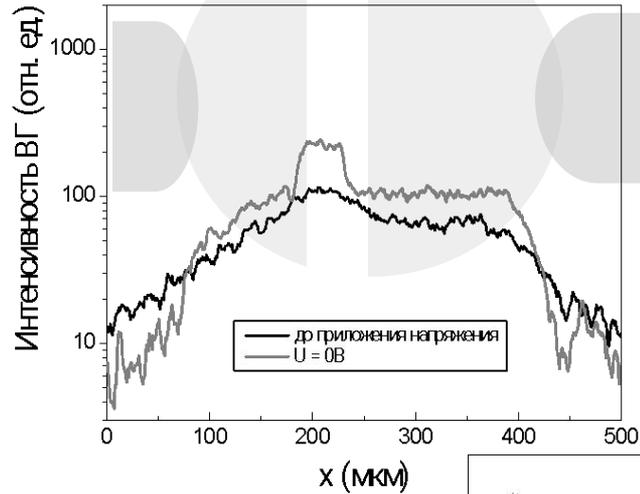


$$I_{2\omega}(P) = I_{bg} + \alpha(P_n + \Delta P_n)^2$$



Пространственное разрешение методики ограничено размером лазерного пятна на поверхности образца (50 мкм).

СКАНИРУЮЩАЯ МИКРОСКОПИЯ ВГ



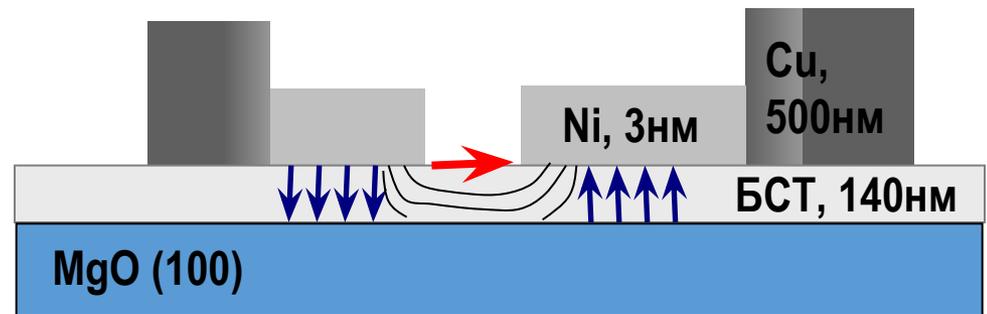
Эпитаксиальные пленки

$\text{Ba}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{TiO}_3 @ \text{MgO}(100)$

$d_f = 140 \text{ нм}$

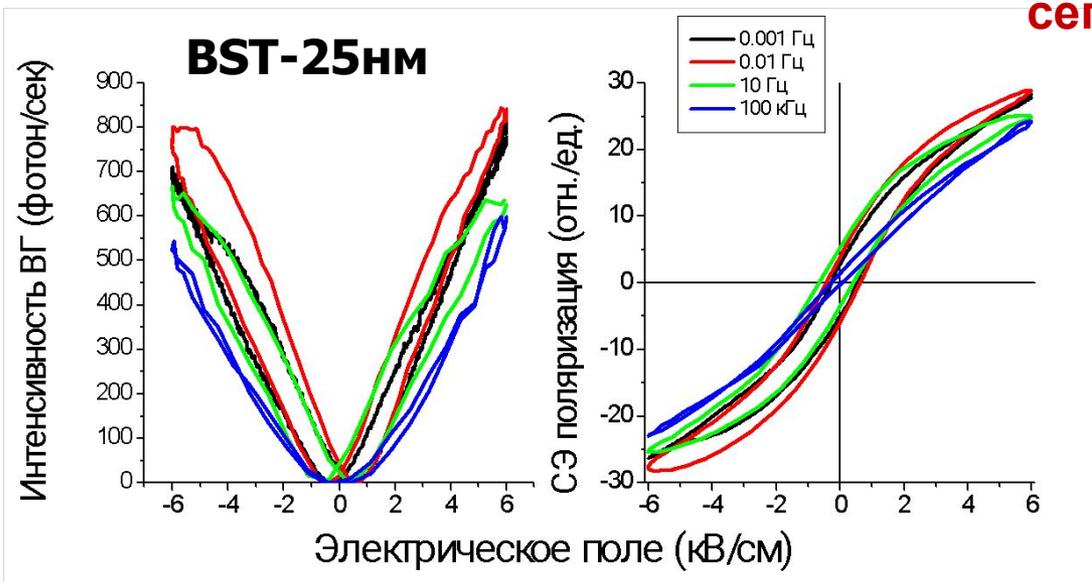
$T_c = 15^\circ\text{C}$

$$I_{2\omega}(P) = I_{bg} + \alpha(P_n + \Delta P_n)^2$$



1. BaSrTiO₃

Нелинейно-оптические исследования процессов переключения в тонких сегнетоэлектрических пленках BST



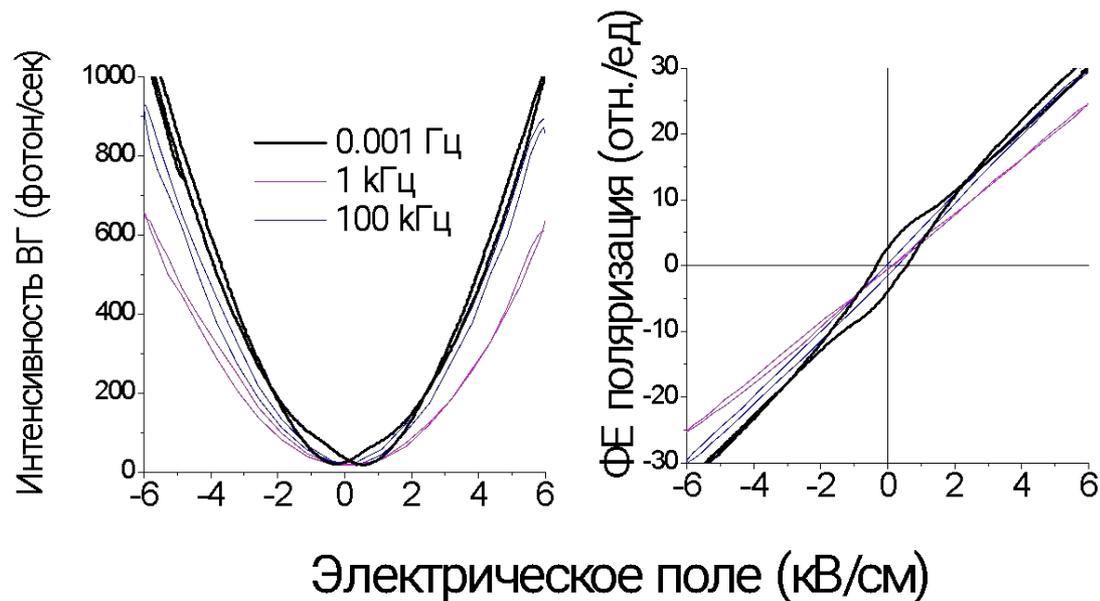
Исследована серия образцов с толщиной 25, 65, 150 и 225 нм в диапазоне частот 1 мГц - 100 кГц

Петли имеют симметричный вид:

- 1. Доля непереключаемой поляризации стремится к нулю
- 2. НО гистерезис появляется только на малых частотах

Полученные методом ГВГ результаты соответствуют электрофизическим измерениям, проведенным В.М. Мухортовым (ЮНЦ РАН)

BST-65 нм



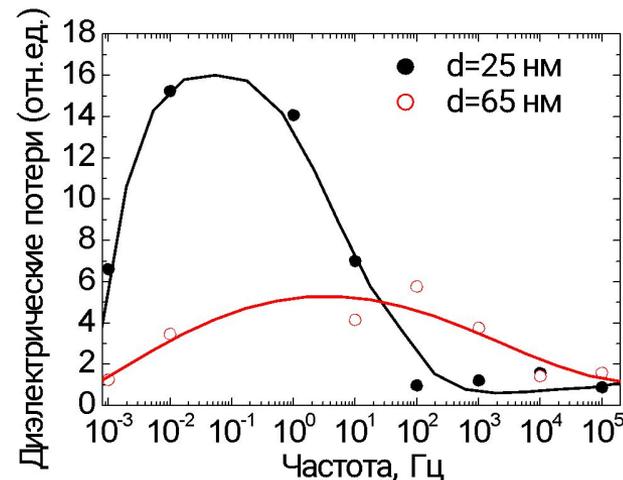
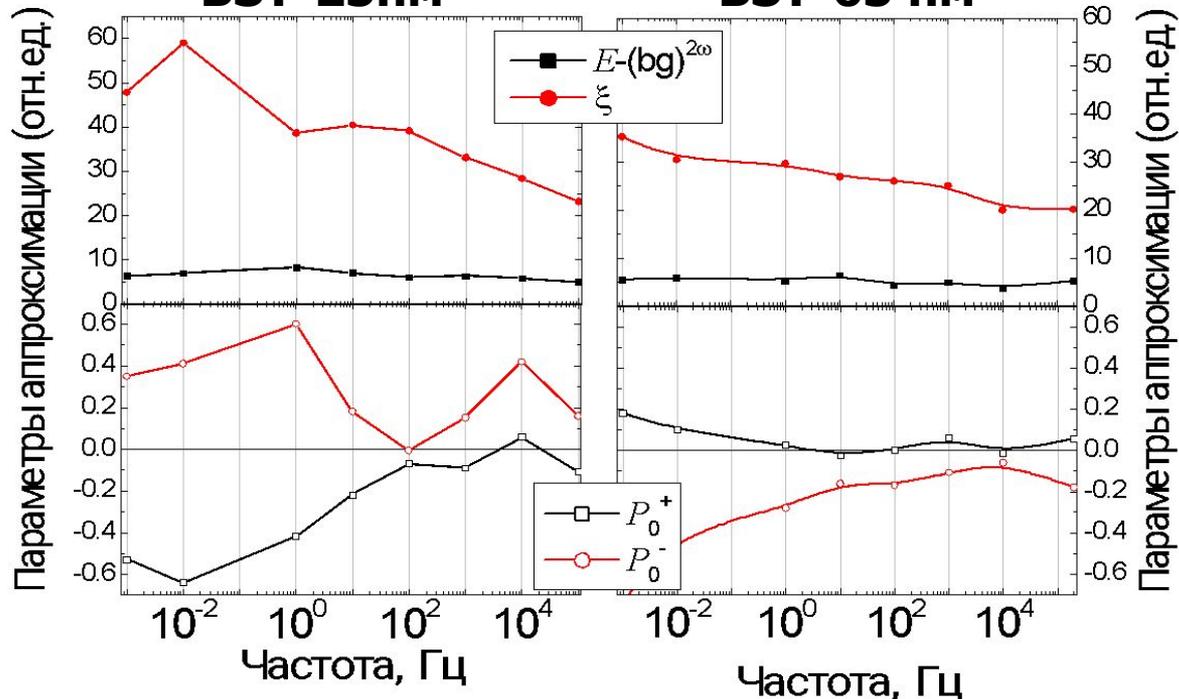
Оценка параметров переключения в зависимости от частоты приложенного поля

Аппроксимация экспериментальных зависимостей соотношением

$$I^{2\omega}(E) \propto (E_{bg}^{2\omega})^2 + \xi (P_0 + P(E))^2$$

BST-25нм

BST-65 нм



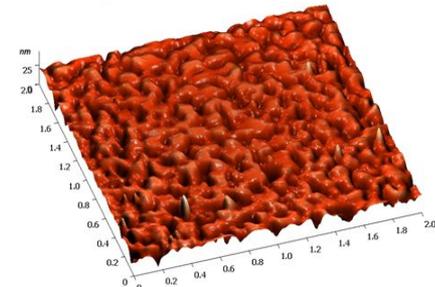
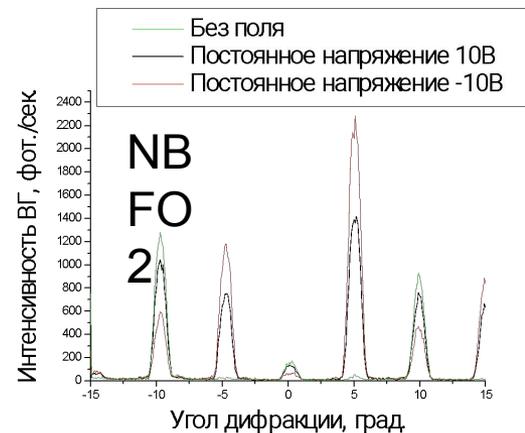
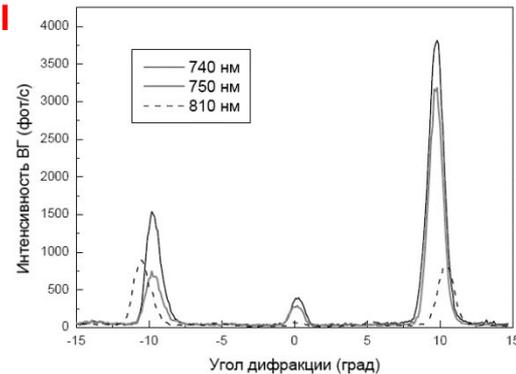
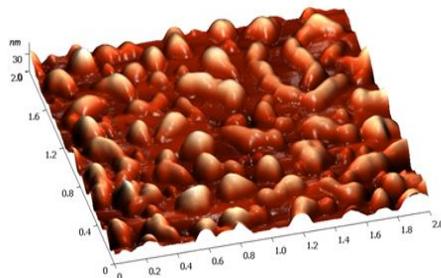
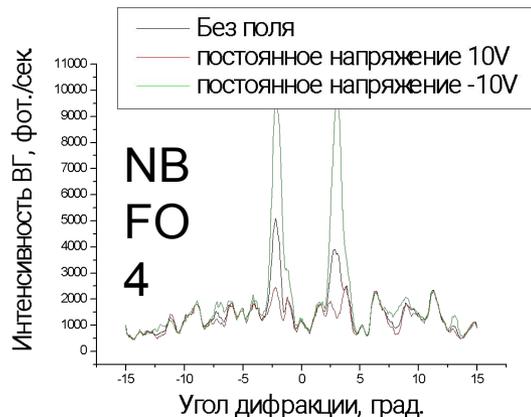
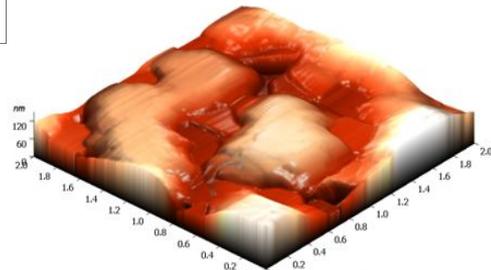
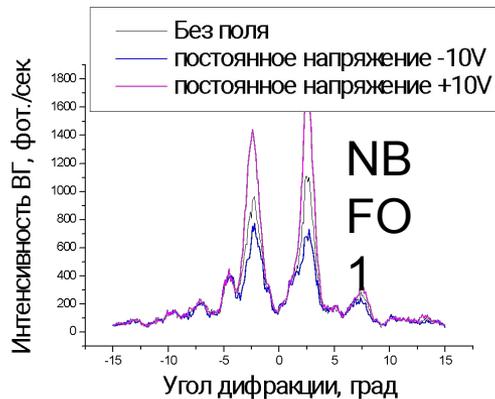
Диэлектрические потери рассчитаны как площадь под зависимостью P(E)

С ростом толщины пленки и частоты переменного электрического поля для всех толщин происходит уменьшение параметра ξ (а, следовательно, и ϵ), и рост доли непереключаемой поляризации. С ростом частоты приложенного поля уменьшаются диэлектрические потери в структуре.

2. NdBiFeO₃

Нелинейно-оптические исследования процессов переключения в тонких сегнетоэлектрических I

	NBFO1	NBFO2	NBFO4
толщина пленки, нм	420	70	210
зазор между электродами, мкм	2,1	1,2	2,2 и 0,6
ширина электрода, мкм	2,2	1,1	2,2 и 1

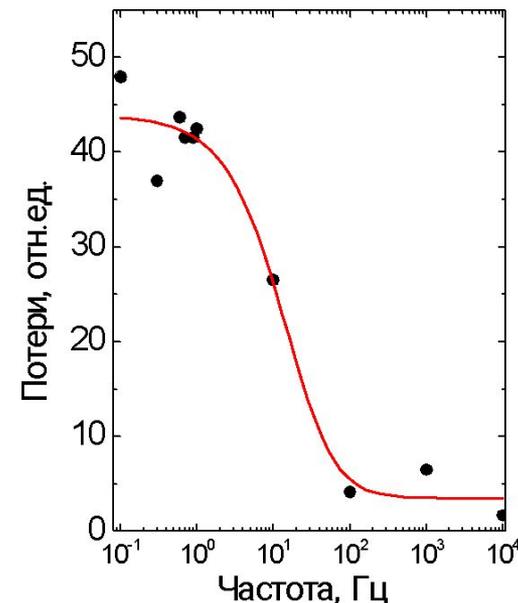
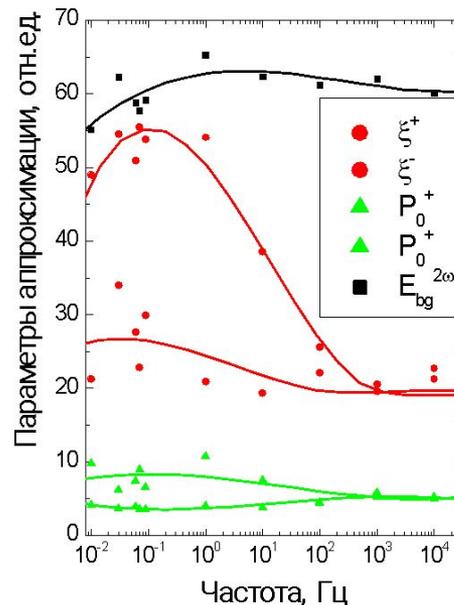
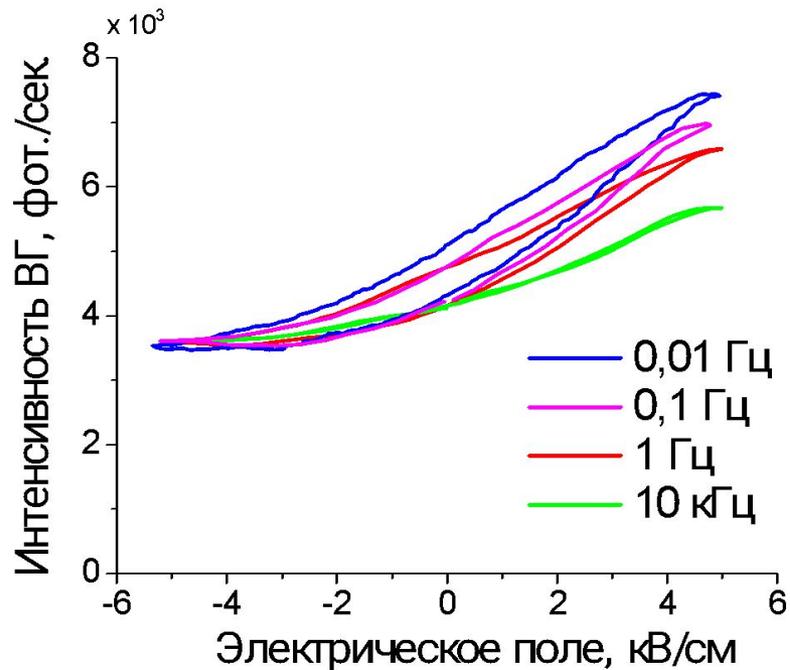


Не когерентная -> непереключаемая
рассеяния -> шероховатость -> широкая индикатриса

Подтверждено AFM



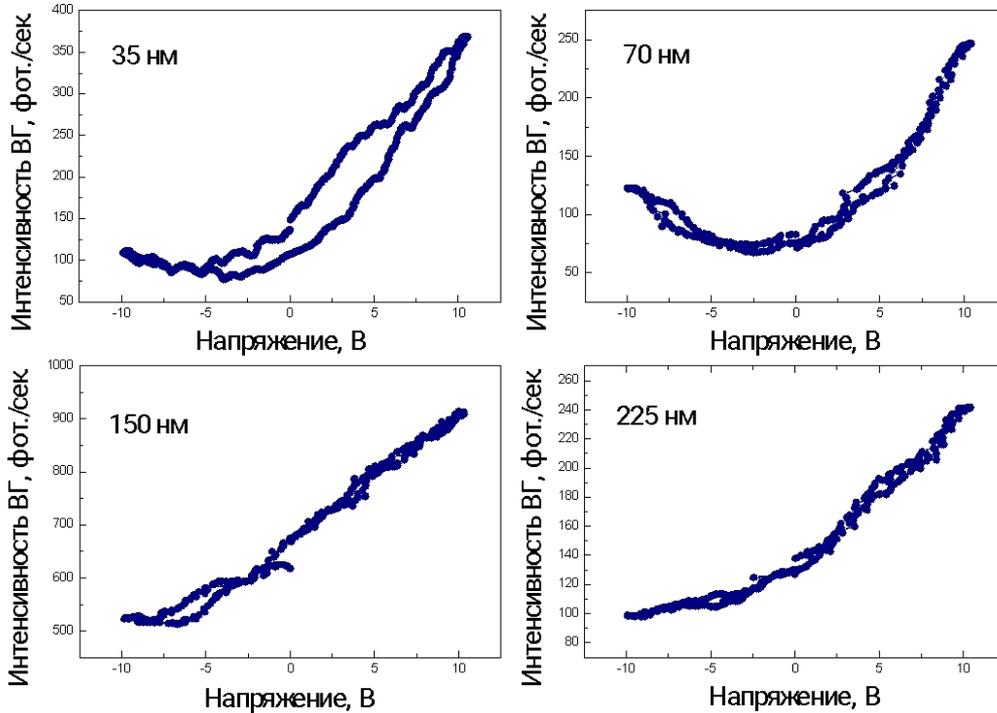
$$I^{2\omega}(E) \propto (E_{bg}^{2\omega})^2 + \xi(P_0 + P(E))^2$$



Зависимости интенсивности ВГ от приложенного напряжения имеют ярко выраженную асимметрию:

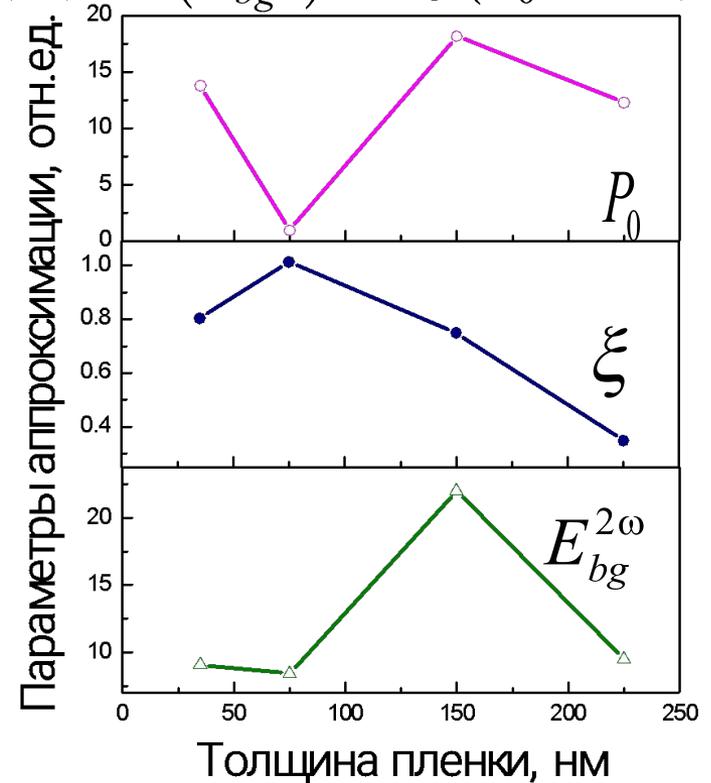
1. Значительная доля непереключаемой поляризации
2. С ростом частоты приложенного поля уменьшаются диэлектрические потери в структуре.
3. С ростом частоты уменьшается ϵ , доля непереключаемой поляризации практически не изменяется

Толщинные зависимости



Аппроксимация

$$I^{2\omega}(E) \propto (E_{bg}^{2\omega})^2 + \xi(P_0 + P(E))^2$$

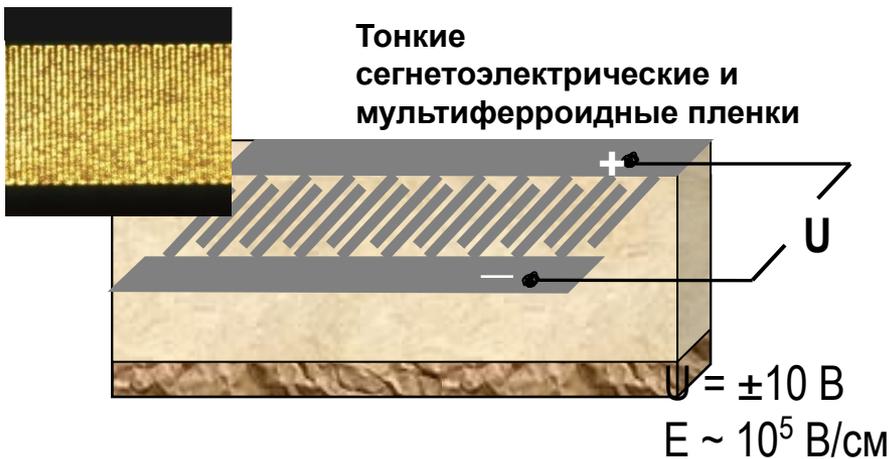


- Заметное уменьшение доли непереключаемой поляризации на толщине 70 нм
- Уменьшение диэлектрической проницаемости с увеличением толщины пленки, что соответствует данным электрофизических измерений

Bi_{0.98}FeNd_{0.02}O₃ (NBFO)
f = 10 мГц

Описание образцов

Тонкие сегнетоэлектрические и мультиферроидные пленки



Методика изготовления: ВЧ-распыление

1. $BaSrTiO_3$

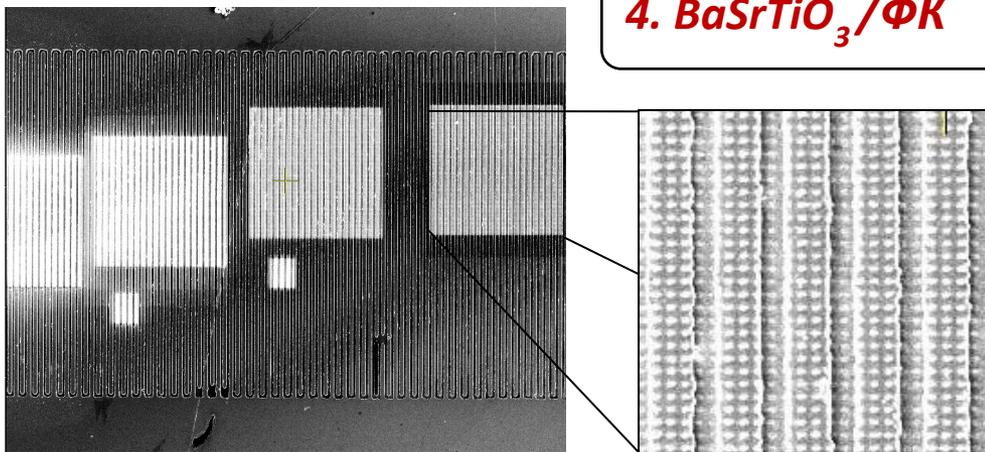
2. $NdBiFeO_3$

3. $NdBiFeO_3/BaSrTiO_3$

Мультислойные структуры
«сегнетоэлектрик/мультиферроик»



4. $BaSrTiO_3/\Phi K$



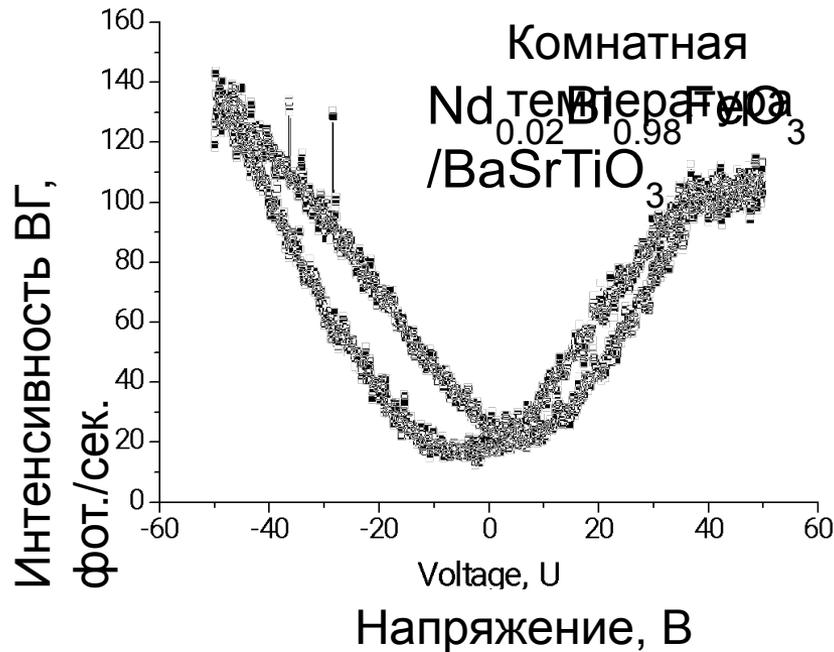
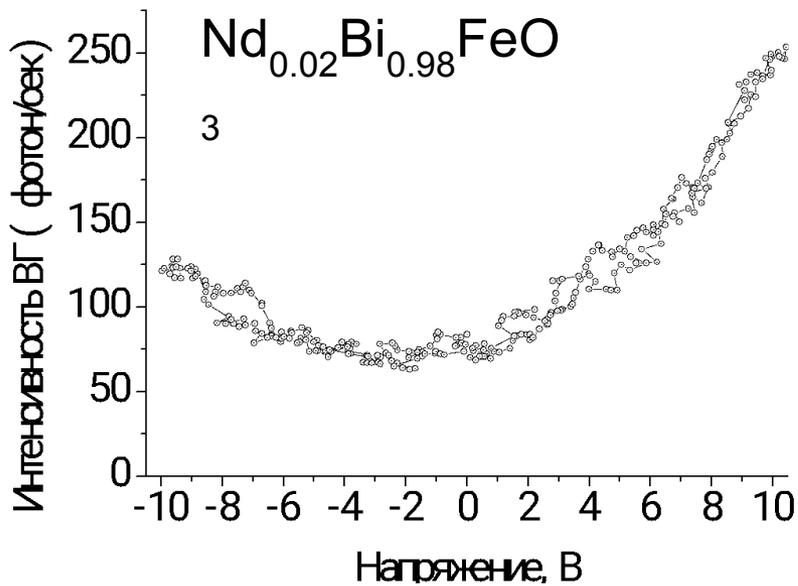
1D и 2D
фотоннокристаллические
структуры на основе СЭ
пленок

Методика изготовления:
травление фокусированным
ионным пучком (МГТУ
МИРЭА)

Вклад BST выше NBFO -> н/о отклик структуры определяется свойствами BST

BaSrTiO₃

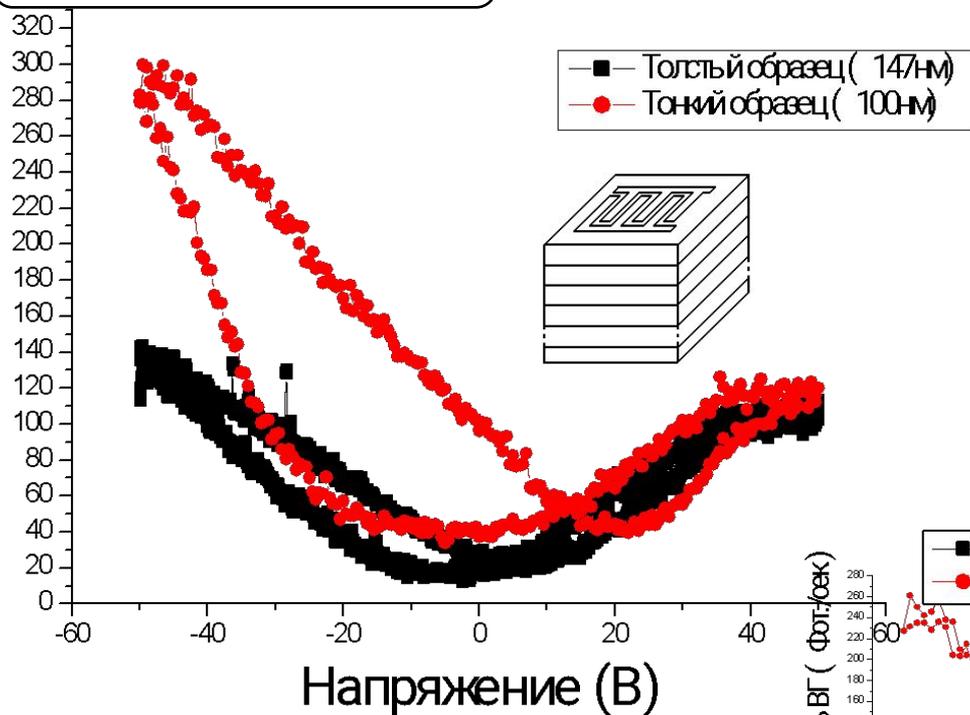
3



- **Чистые пленки 100 нм:**
Интенсивность ВГ в BST в 20 раз выше, чем в пленках NBFO
- **Мультислойные структуры (N=5, толщина =20 нм):**
Несимметричная петля
Низкий уровень E_{bg}

3. $NdBiFeO_3 / BaSrTiO_3$

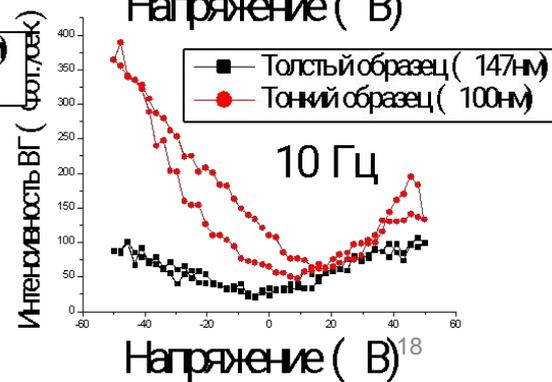
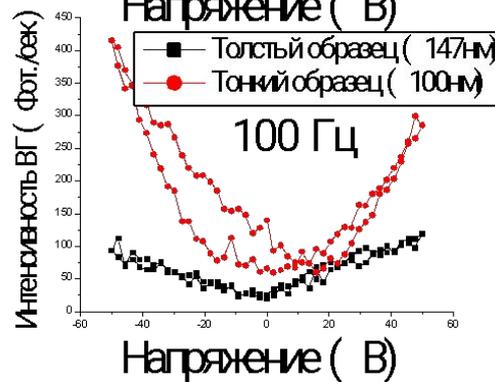
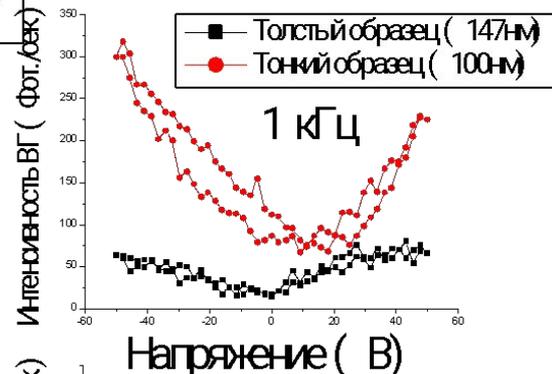
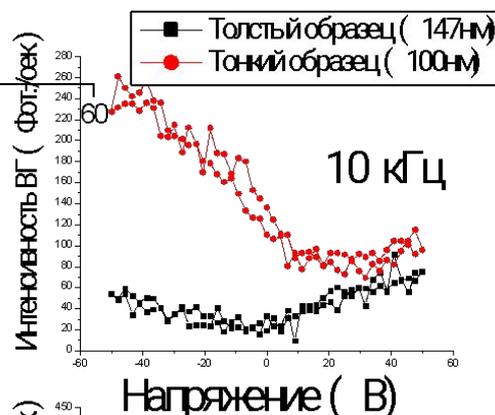
Интенсивность ВГ (фотон.сек)



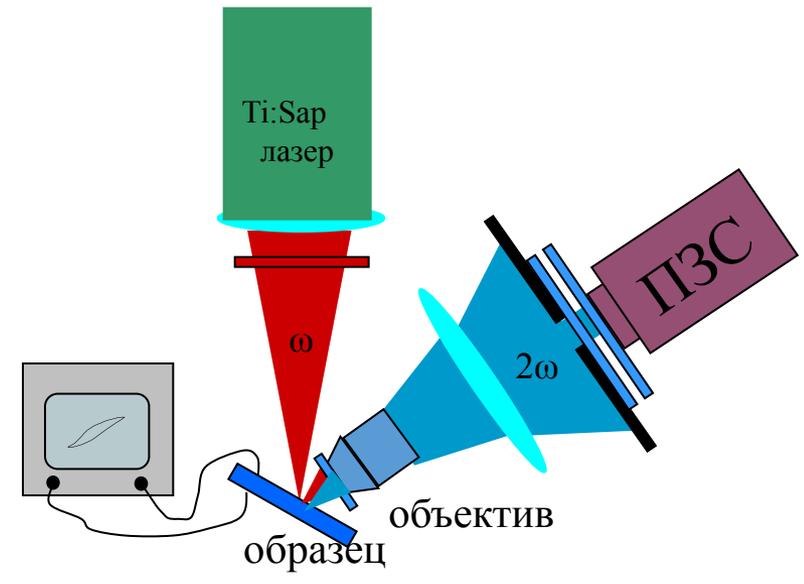
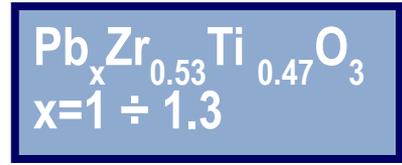
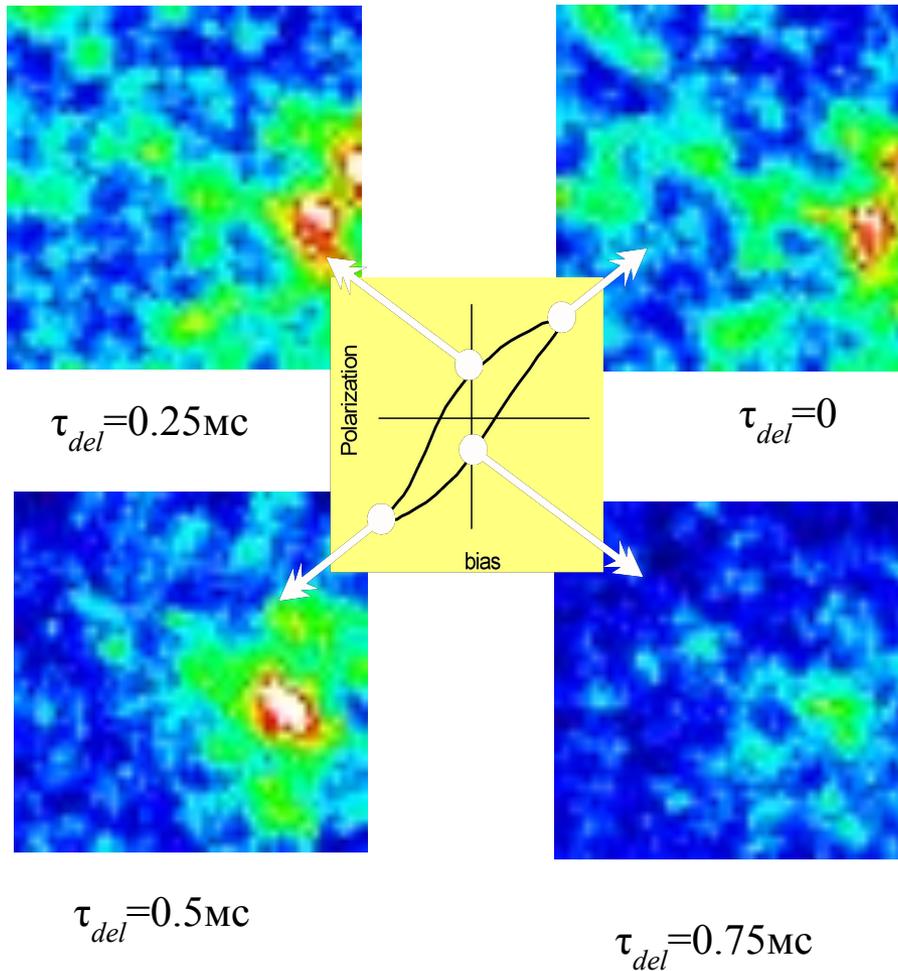
Мультиферроидные структуры
сегнетоэлектрик/мультиферроик

С уменьшением общей толщины возрастает асимметрия НО отклика - возрастает доля непереключаемой поляризации (когерентная и некогерентная составляющая) – влияние механических напряжений на границе слоев.

Та же тенденция проявляется на частотных зависимостях

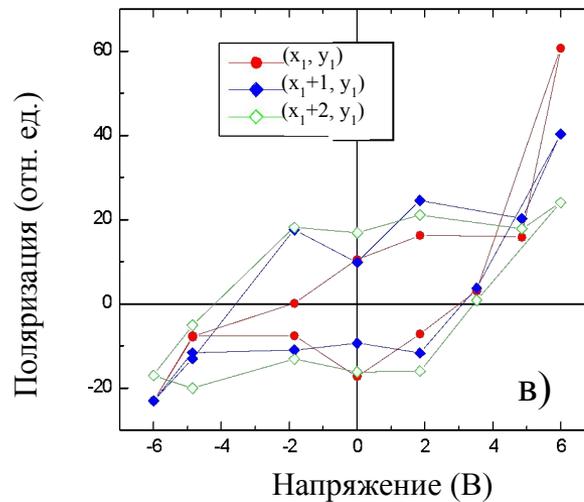
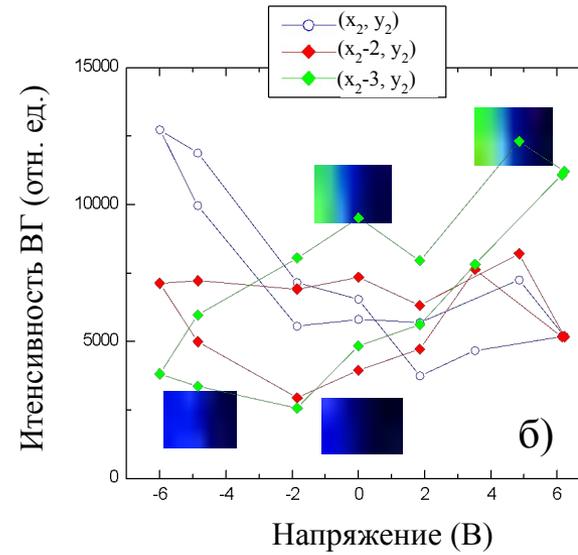
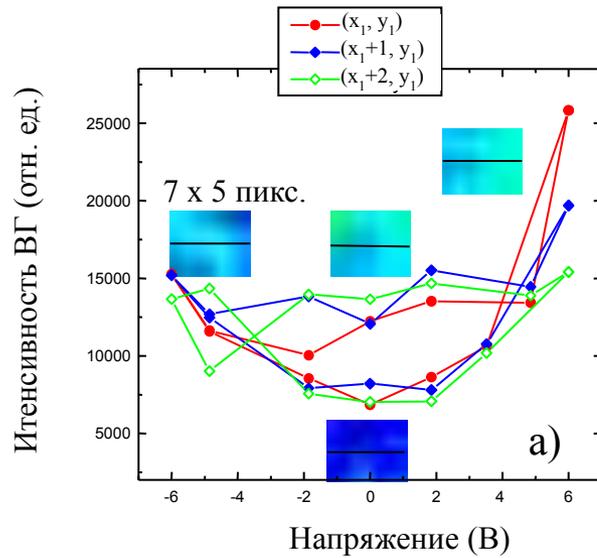


МИКРОСКОПИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ВГ



$\Gamma = 50$

МИКРОСКОПИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ВГ

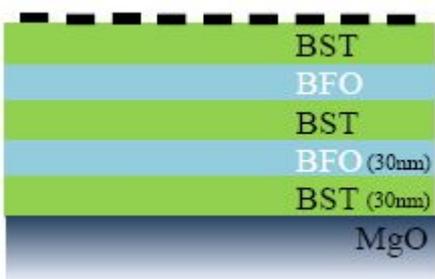


$$\Delta x = 1,22\lambda/2 \times NA \approx 400\text{нм}$$

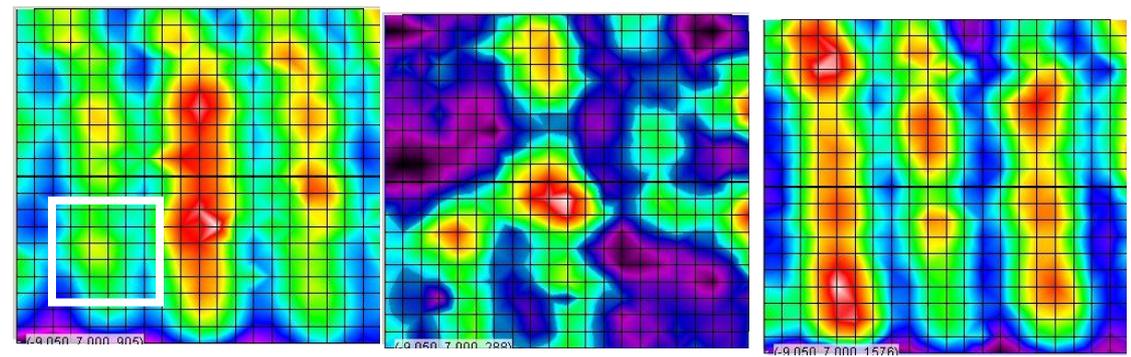
3. $NdBiFeO_3 / BaSrTiO_3$

Нелинейно-оптическая микроскопия (дальнепольная),
оценка эффективности переключения.

BST/NBFO
электро-индуцированная ВГ

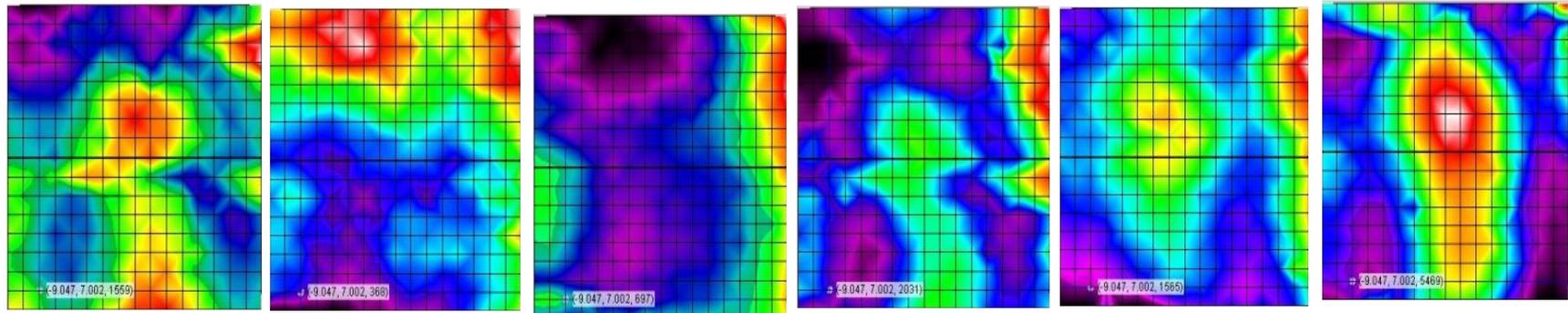


15 x 15 мкм



+30V
-30 V

0 V
8 x 8 мкм



-40V
+40V

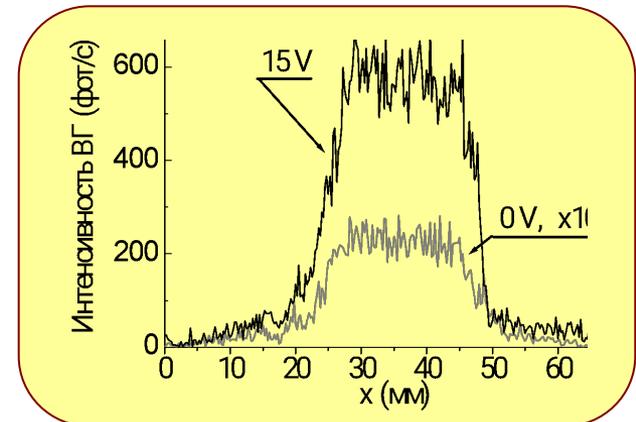
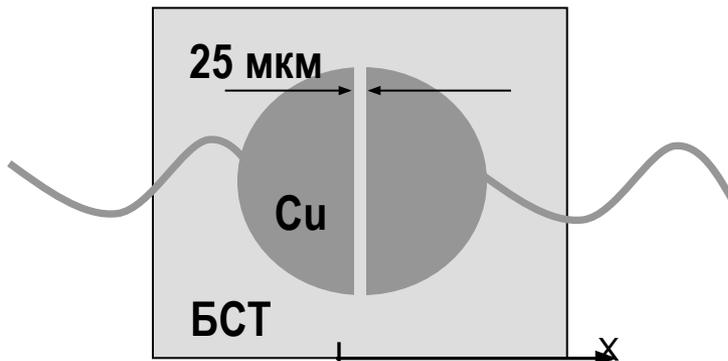
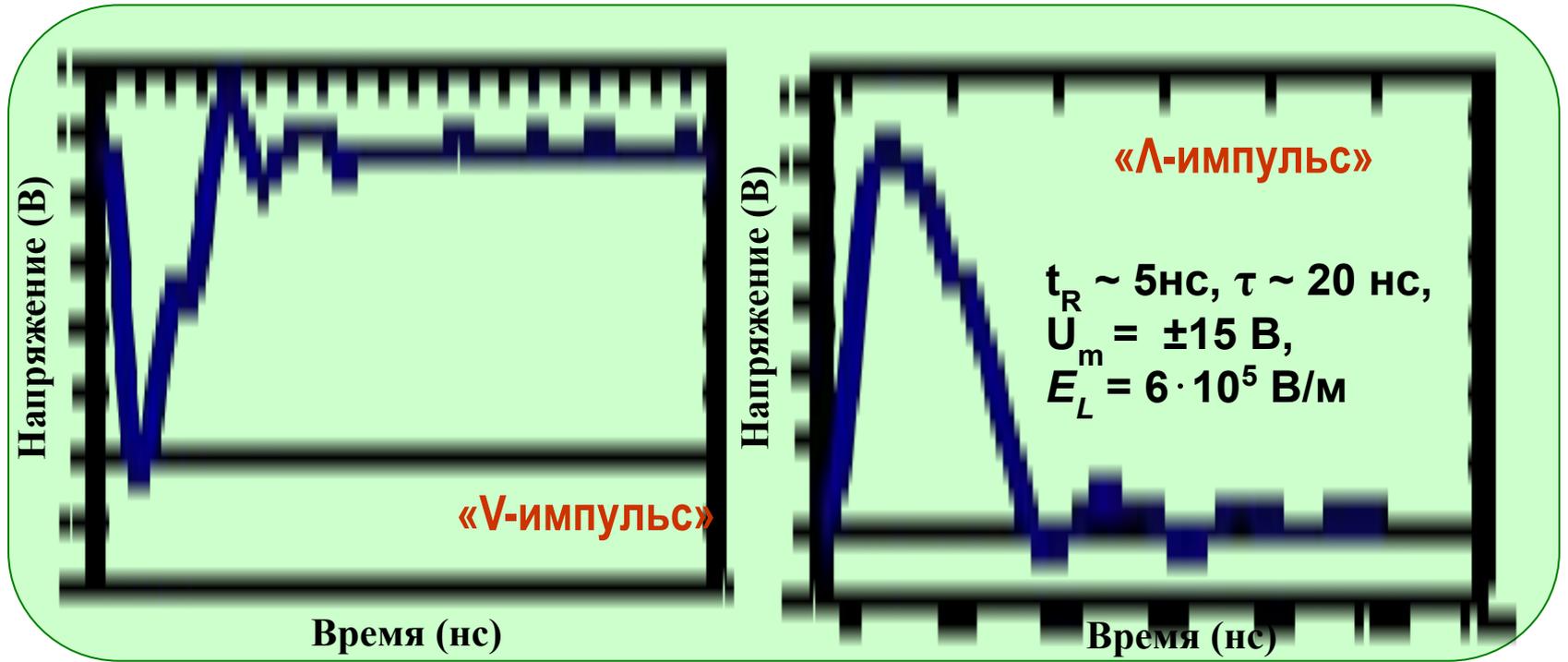
-20V

-10V

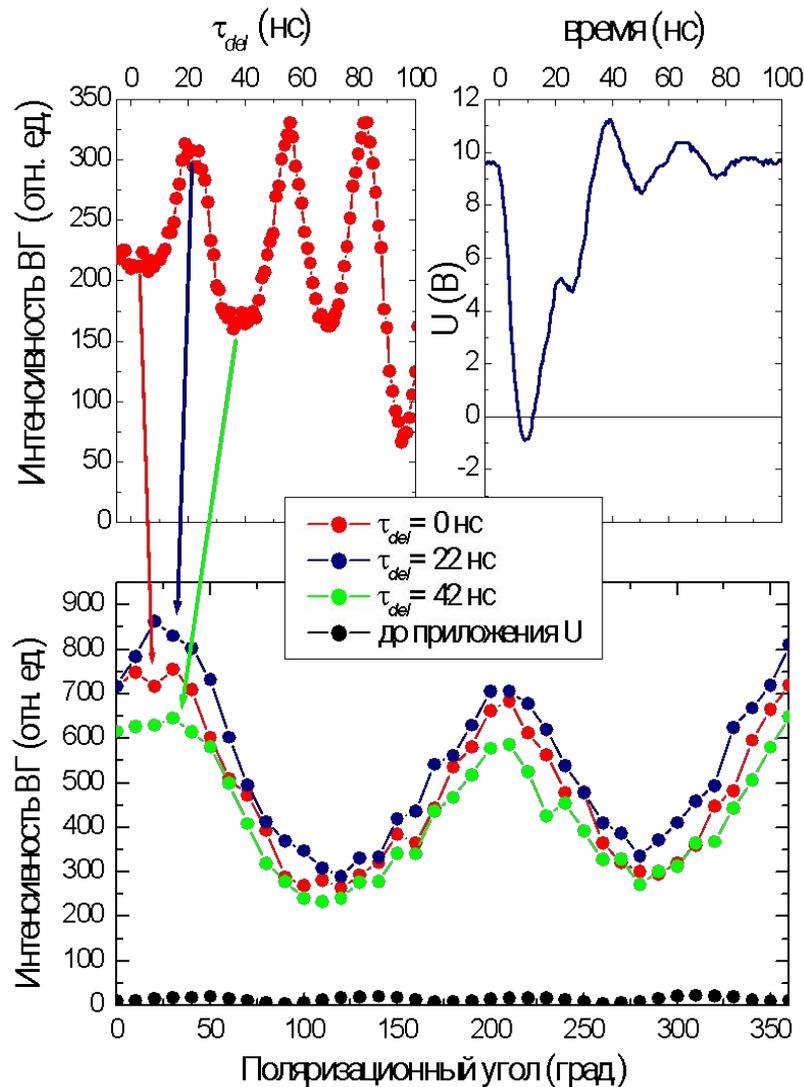
+10V

+20V

СХЕМА ИЗМЕНЕНИЯ ВНЕШНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ: ДВА ТИПА ИМПУЛЬСОВ

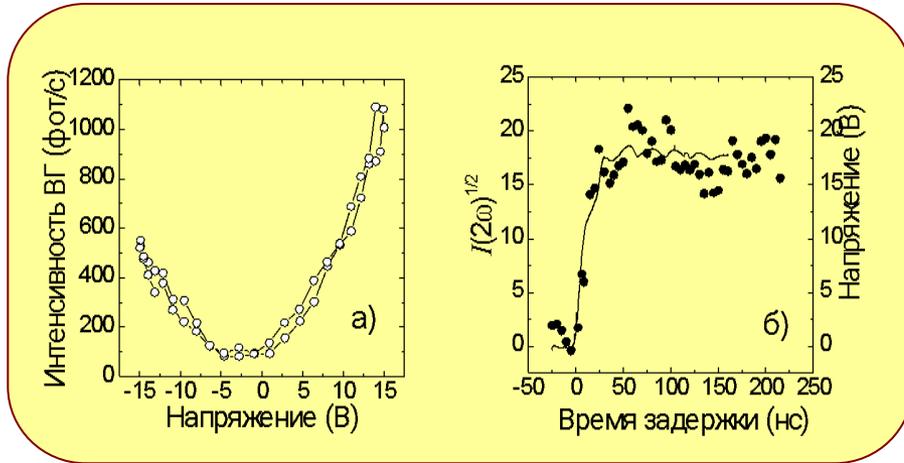


ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ДИАГРАММЫ ВГ



Поведение сигнала ВГ в зависимости от приложенного напряжения соответствует состоянию доменной структуры пленки в данный момент времени и может использоваться для диагностики процессов переключения в пленках.

ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ВНЕШНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ



$$I_{2\omega} \propto \left(P_0^d + P^d(E_0) \right)^2$$

$$\tau_D \frac{dP_x}{dt} = A_0(T - T_c)P_x + BP_x^3 + \varepsilon_0 E_x$$

$$P_x = \int \left(p_x^+ - p_x^- \right) dV = \Delta F_x$$

$$\sqrt{I(2\omega)} \propto |\Delta F_x|$$

Временное разрешение методики ограничено пределом временного разрешения системы детектирования ($\tau_{pc} = 5$ нс)

