



*Российская Академия Наук*

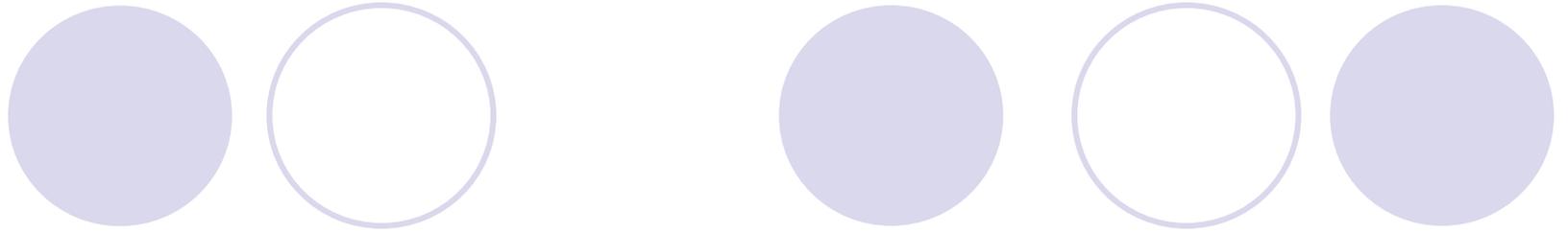
**РАЗРАБОТКА СОВРЕМЕННЫХ  
АКУСТОЭЛЕКТРОННЫХ БИОЛОГИЧЕСКИХ,  
ХИМИЧЕСКИХ И ФИЗИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ В  
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН**

**Ирен Е. КУЗНЕЦОВА**

**Глав.научн.сотр., д.ф.-м.н., профессор РАН**

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





**Работы проводятся в  
Московской части ИРЭ –  
Анисимкин В.И., Кузнецова И.Е.  
В Саратовском филиале ИРЭ –  
Зайцев Б.Д.**

# Физические принципы реализации сенсоров

- электрохимический,
- волоконно-оптический,
- кондуктометрический,
- калориметрический,
- резистивный,
- акустоэлектронный,
- сверхпроводниковый,
- генно-инженерный,
- наноэлектронный,
- магнитный,
- акусто-оптический



# Области применения сенсоров

- экология,
- биомедицина,
- производство,
- робототехника
- «умный» дом
- автомобилестроение

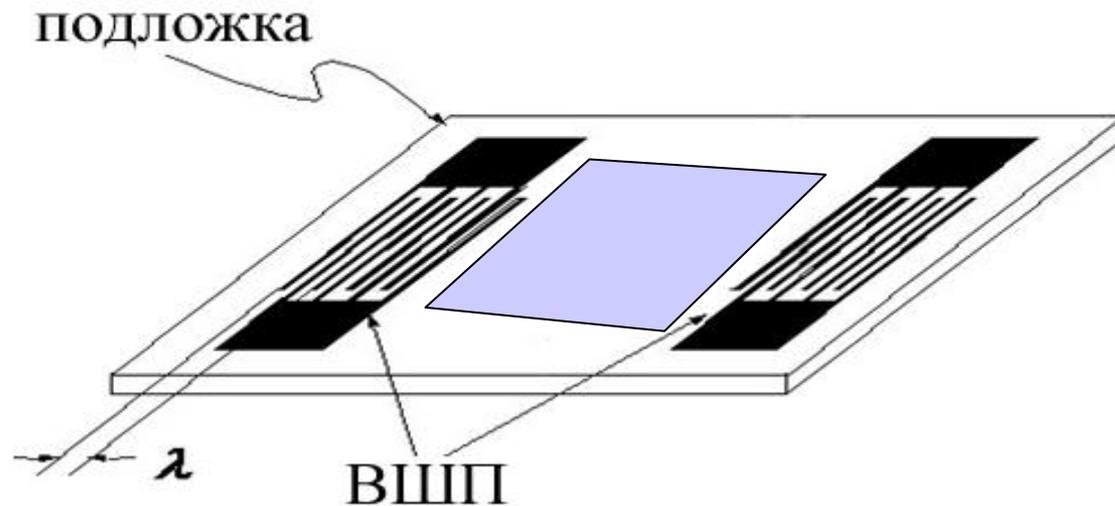


# **Тенденции развития сенсоров**

- Носимые устройства, в т.ч. гибкая электроника;**
- Объединение и миниатюризация датчиков;**
- Устройства для персональной медицины;**
- Датчики на основе нескольких физических принципах;**
- Улучшение параметров существующих устройств**

# Разработка новых и совершенствование существующих акустоэлектронных датчиков

## Принцип функционирования акустоэлектронных датчиков



Для разработки подобных датчиков необходимо проводить поиск новых материалов и типов волн и анализировать их реакцию на изменение граничных условий.

# Акустический датчик влажности с пленкой оксида графена

Ultrasonics 2017(81) 135

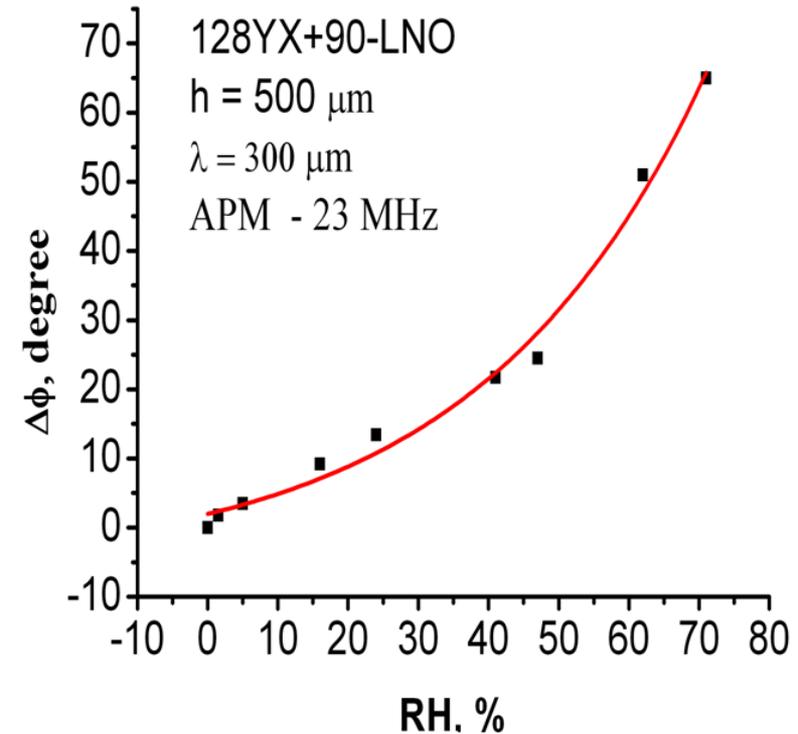
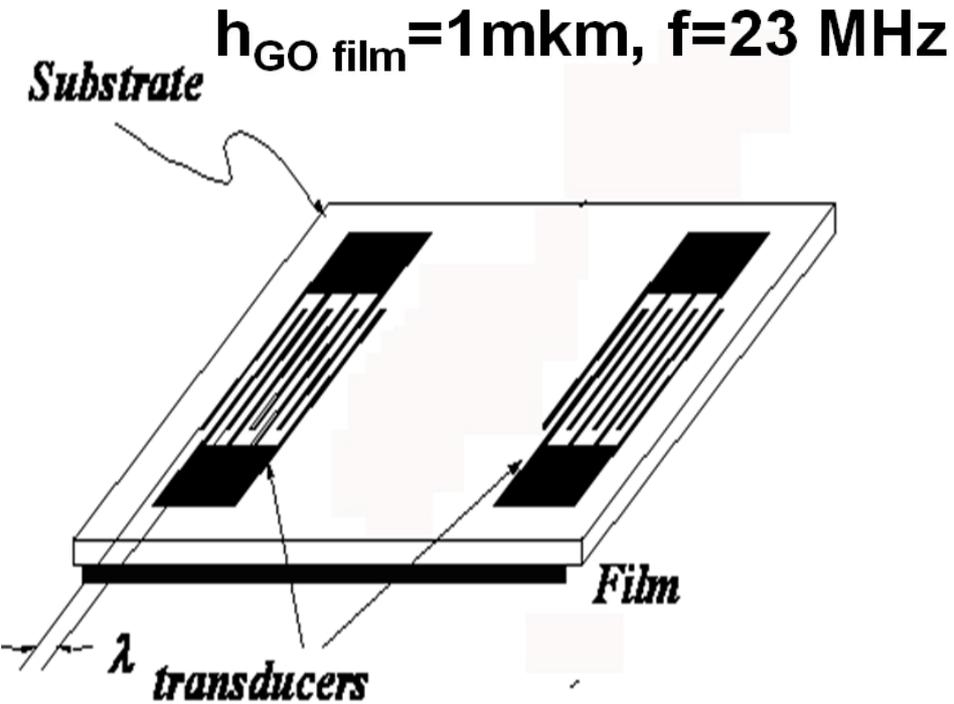


Схема и калибрационная кривая

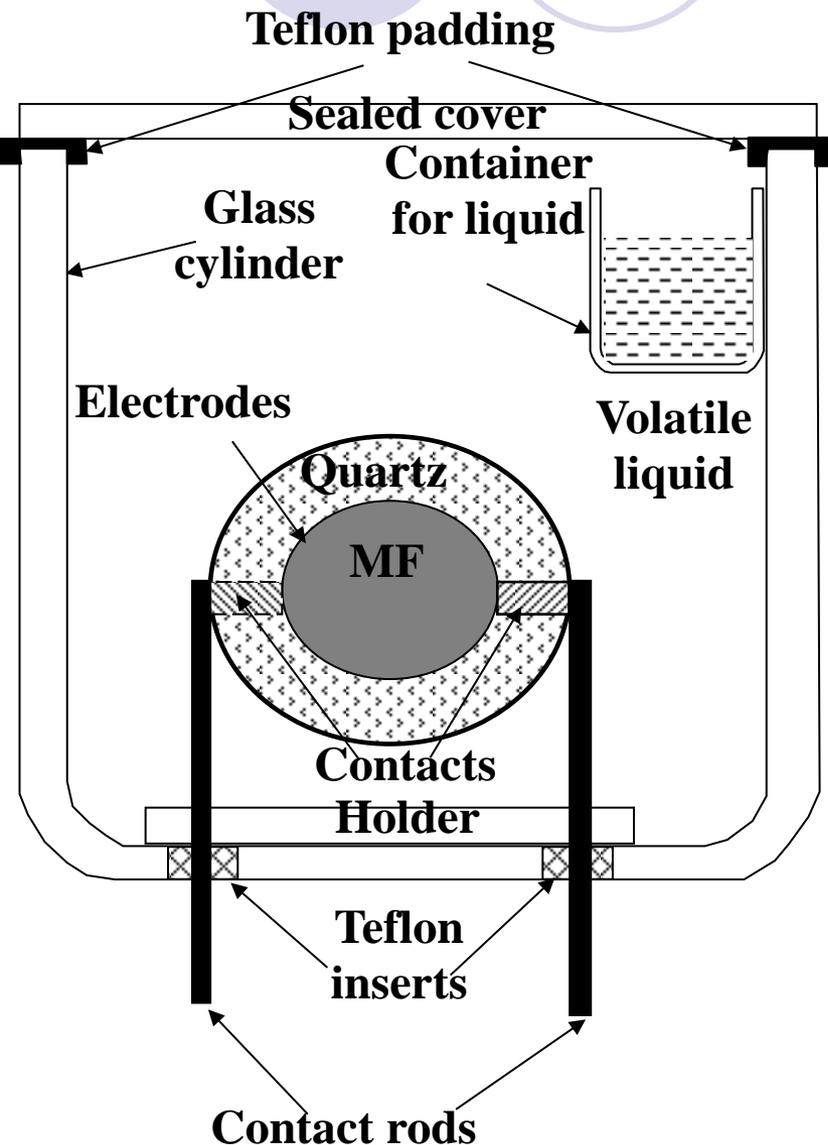
**Порог срабатывания при RH=0.03%!!!**

Пленка ОГ не чувствительна к O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, NO

Чувствительность можно еще повысить используя волну Сезава в структуре «ОГ пленка - ZnO пленка – Si подложка»  
Sens. and Actuat.B, 2018 (272), 236

# Акустический газовый датчик с пленкой из мицелия грибов

Sens. and Act.:B 2017(243) 525

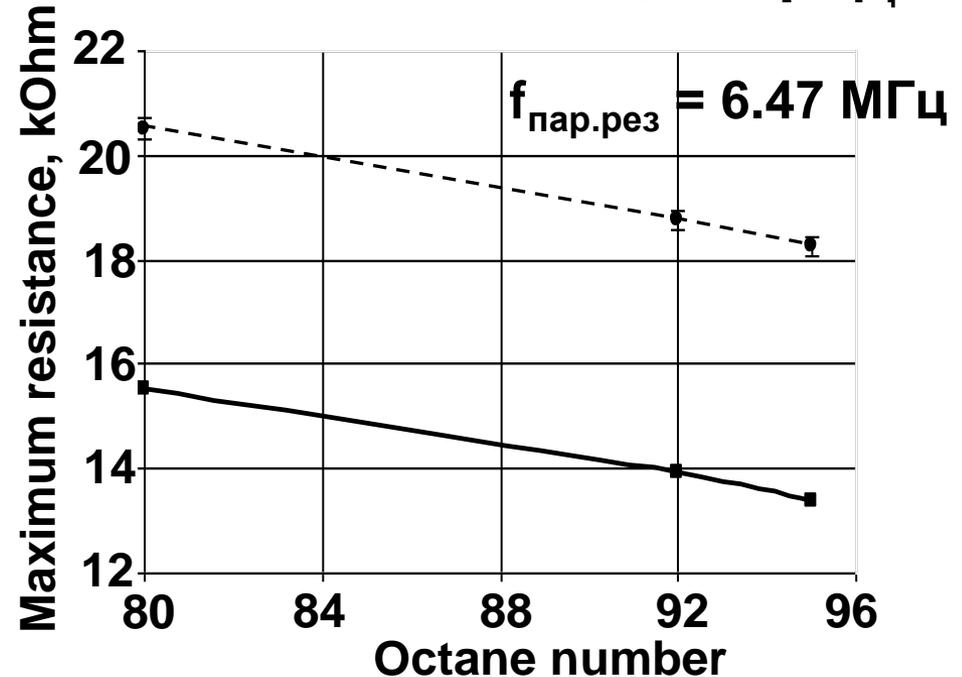
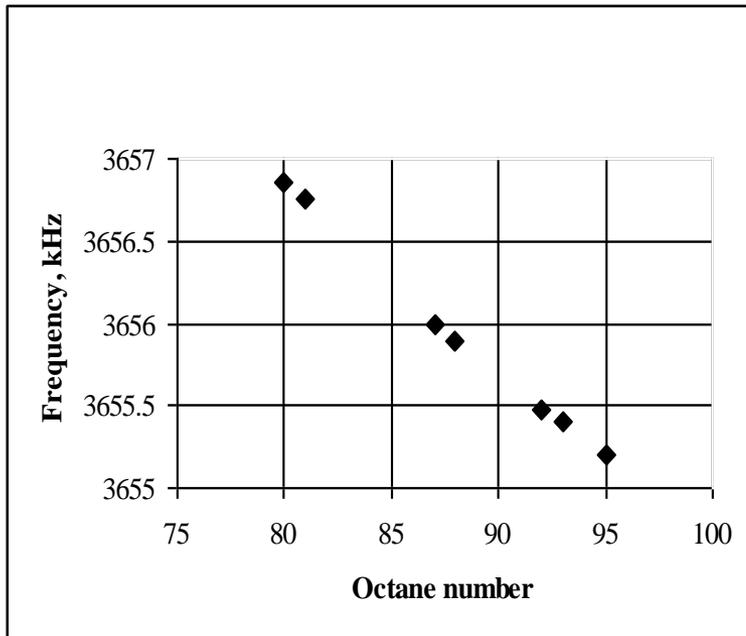
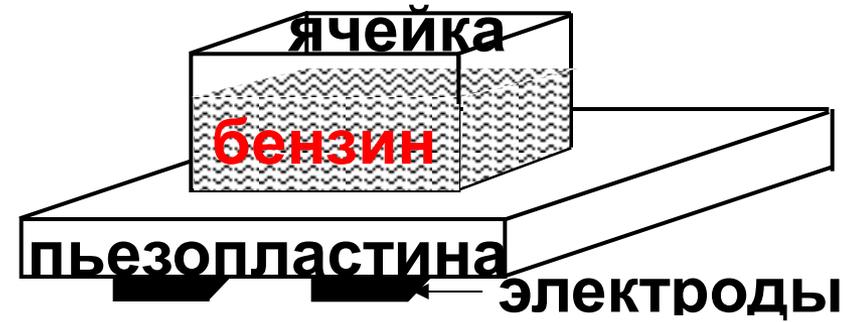


Изменения упругих модулей, плотности и вязкости пленок из мицелия *L.edodes* в присутствии/отсутствии целевого газа - обратимо. Эти пленки в зависимости от методики их приготовления могут использоваться для регистрации аммиака, этилацета и формальдегида.

# Акустические идентификаторы бензина

Ultrasonics 2016(70) 34

Ultrasonics 2017(80) 96



# ИНТЕГРАЛЬНАЯ РЕШЕТКА АКУСТИЧЕСКИХ ЖИДКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ

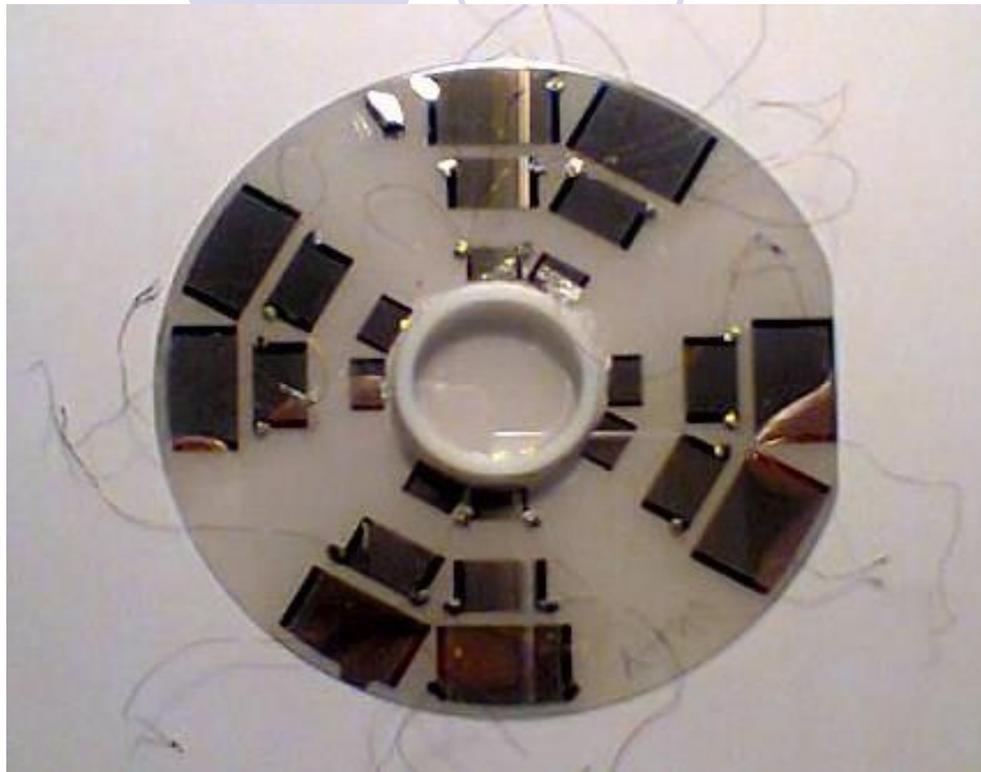
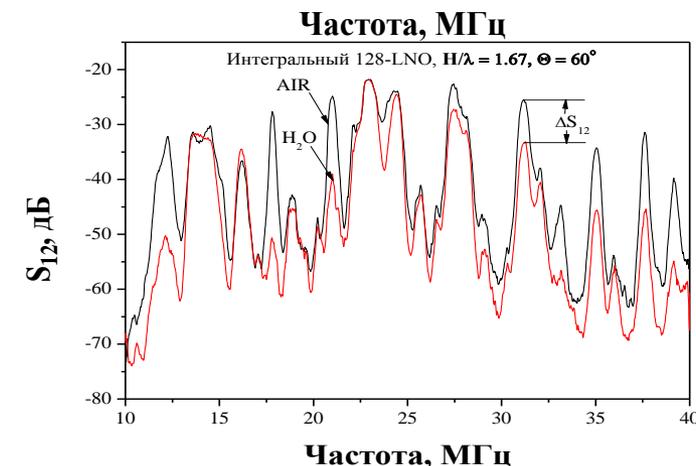
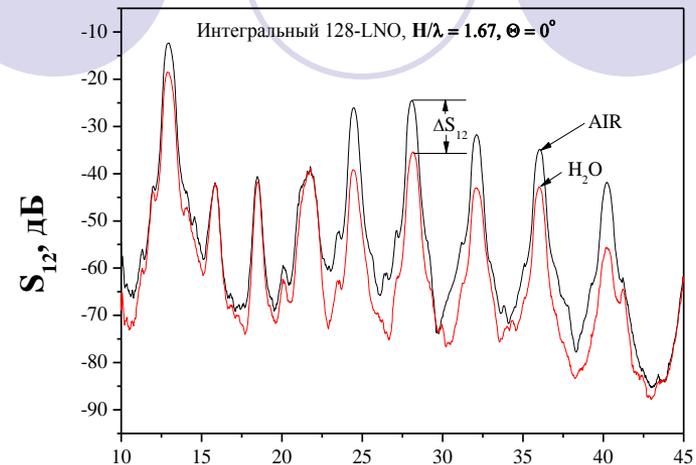


ФОТО ДАТЧИКА

Интегральная решетки акустических датчиков жидкости, выполненная на трехдюймовой пластине  $128^\circ\text{Y-LiNbO}_3$ . Содержит 3 системы по 4 пары встречно-штыревых преобразователей. В центре решетки - тефлоновая ванночка диаметром 20 мм и стенками толщиной 2 мм.

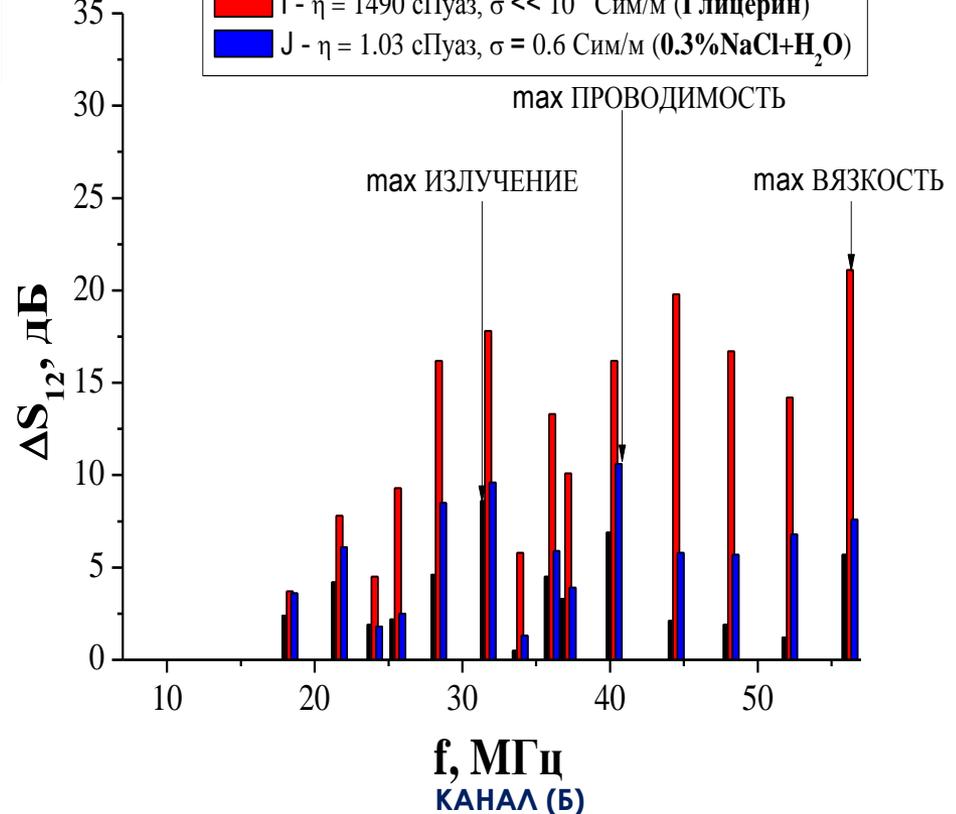
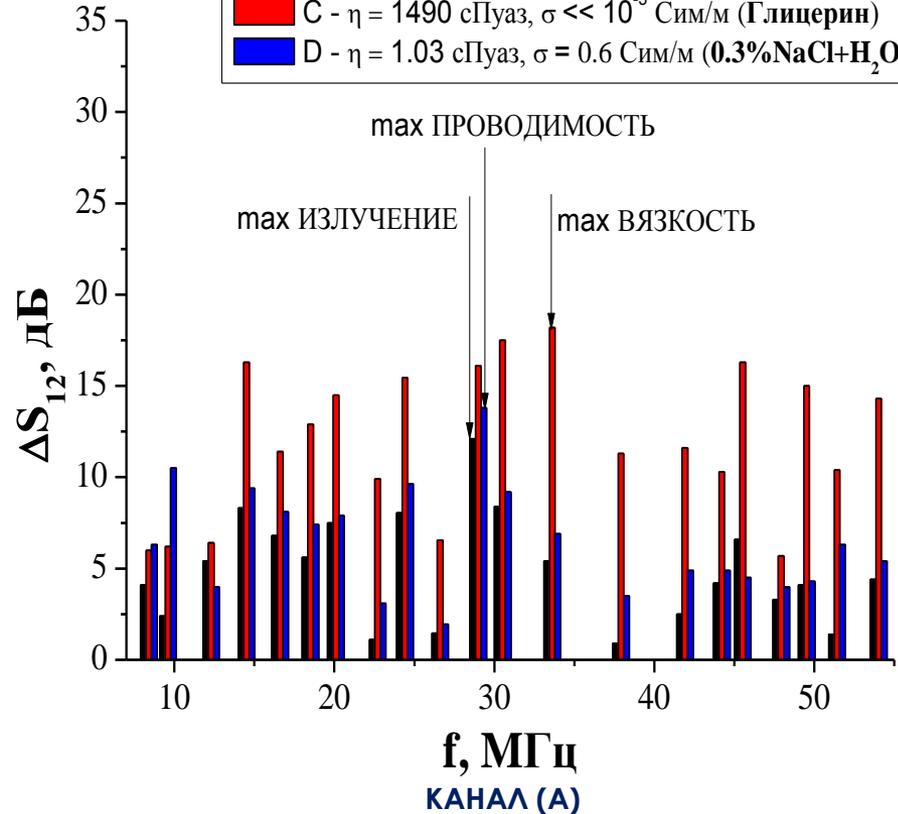


Амплитудно-частотные характеристики нормальных акустических волн (параметр  $|S_{21}|$ ) каналов  $\Theta = 0^\circ$  и  $60^\circ$  при толщине пластины  $H/\lambda = 1.67$  (с и без жидкости H<sub>2</sub>O). Метки 1 - 11 - нормальные волны разных номеров  $n$ .

# АМПЛИТУДНЫЕ ОТКЛИКИ

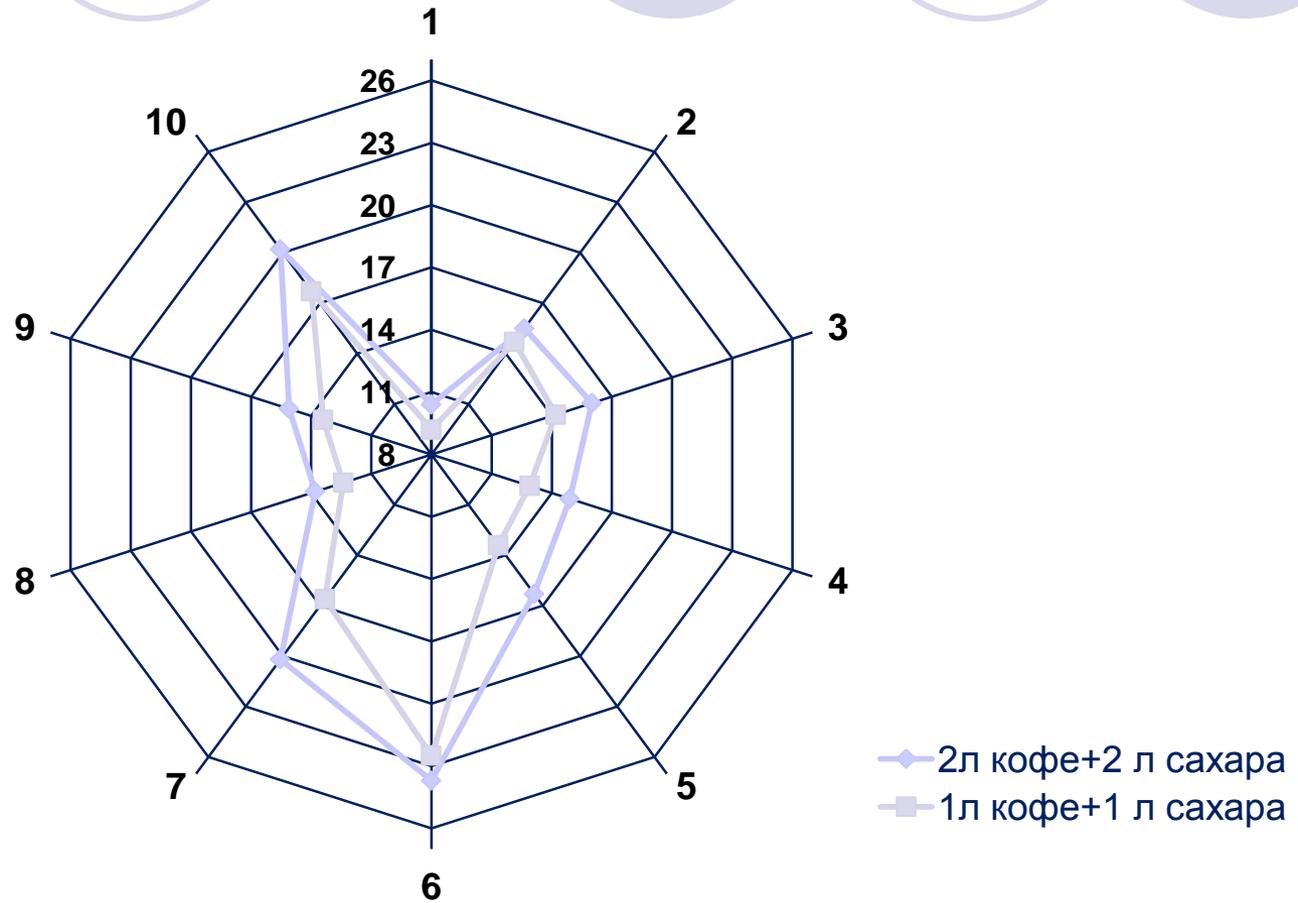
В -  $\eta = 1.03$  сПуаз,  $\sigma \ll 10^{-3}$  Сим/м ( $H_2O$ )  
 С -  $\eta = 1490$  сПуаз,  $\sigma \ll 10^{-3}$  Сим/м (Глицерин)  
 D -  $\eta = 1.03$  сПуаз,  $\sigma = 0.6$  Сим/м (0.3%NaCl+ $H_2O$ )

H -  $\eta = 1.03$  сПуаз,  $\sigma \ll 10^{-3}$  Сим/м ( $H_2O$ )  
 I -  $\eta = 1490$  сПуаз,  $\sigma \ll 10^{-3}$  Сим/м (Глицерин)  
 J -  $\eta = 1.03$  сПуаз,  $\sigma = 0.6$  Сим/м (0.3%NaCl+ $H_2O$ )



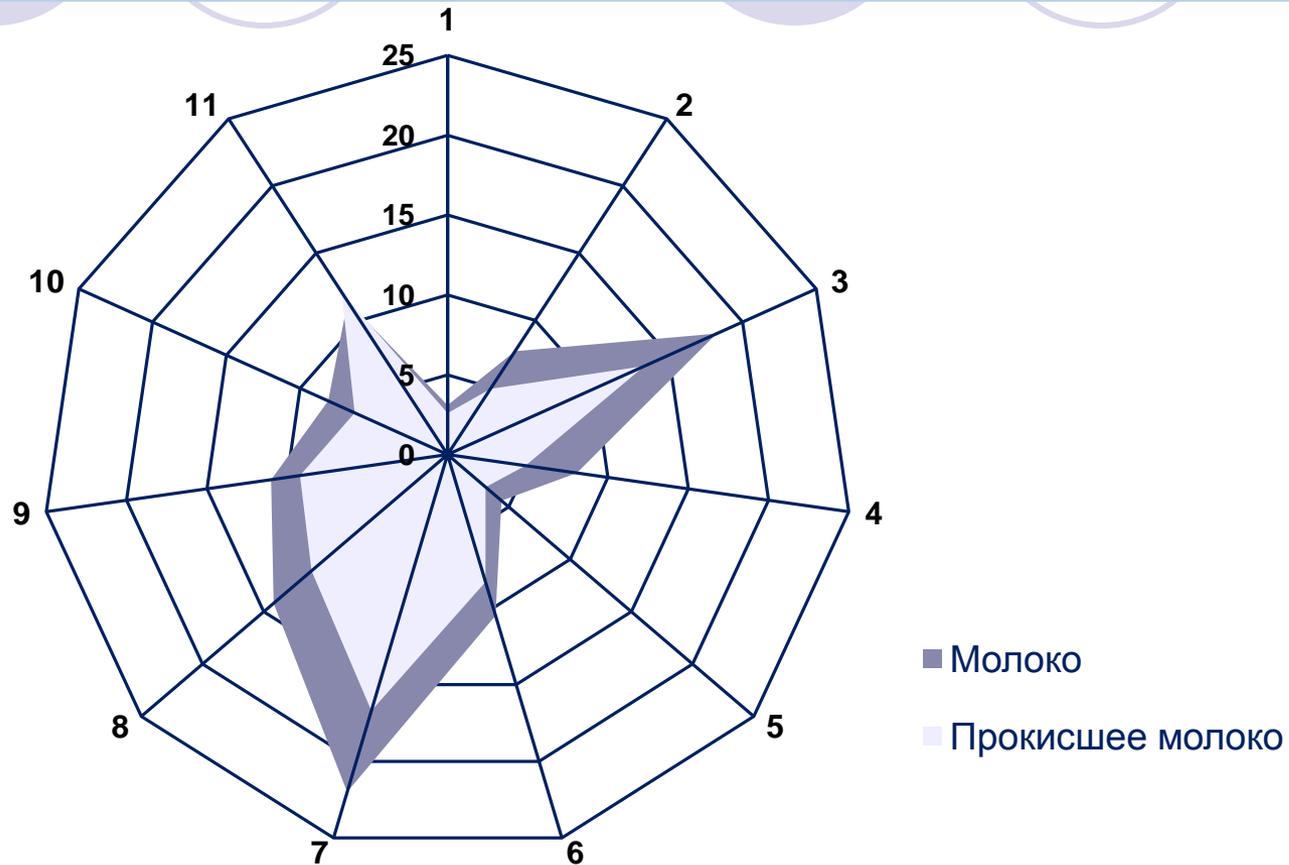
Амплитудные «отклики» нормальных волн в пластинах с разной толщиной  $N/\lambda = 1.02$  (А) и  $2.5$  (Б) при фиксированном направлении распространения  $\Theta = 60^\circ$ .

## КОФЕ



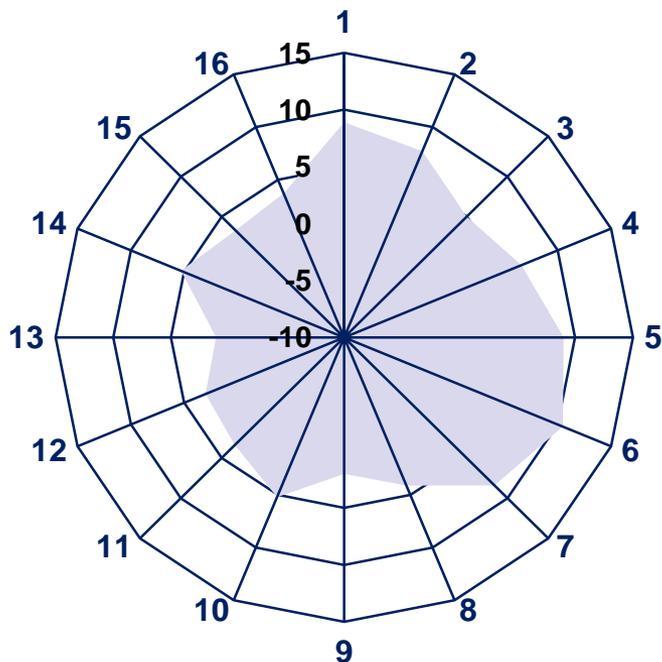
**Амплитудные «отклики» нормальных волн в пластине толщиной  $H/\lambda = 1.67$  при фиксированном направлении распространения  $\Theta = 60^\circ$ .**

# МОЛОКО

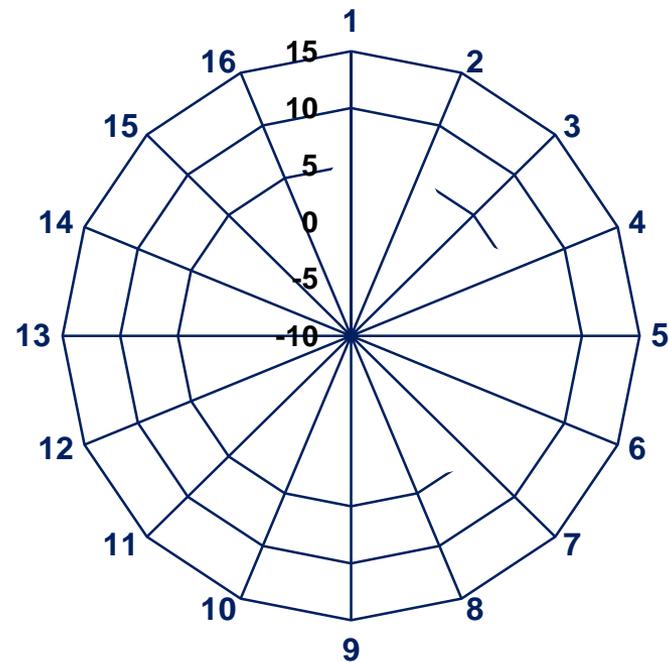


Амплитудные «отклики» нормальных волн в пластине толщиной  $H/\lambda = 1.67$  при фиксированном направлении распространения  $\Theta = 60^\circ$ .

# ВОДА



■ святая вода



вода из колодца

Амплитудные «отклики» нормальных волн в пластине толщиной  $H/\lambda = 1.67$  при фиксированном направлении распространения  $\Theta = 60^\circ$ .

**Пьезоэлектрические резонаторы с поперечным электрическим полем свободны от недостатков резонаторов на продольных волнах, поскольку электроды находятся на одной стороне пластины, а акустическая волна распространяется, в основном, в пространстве между электродами.**

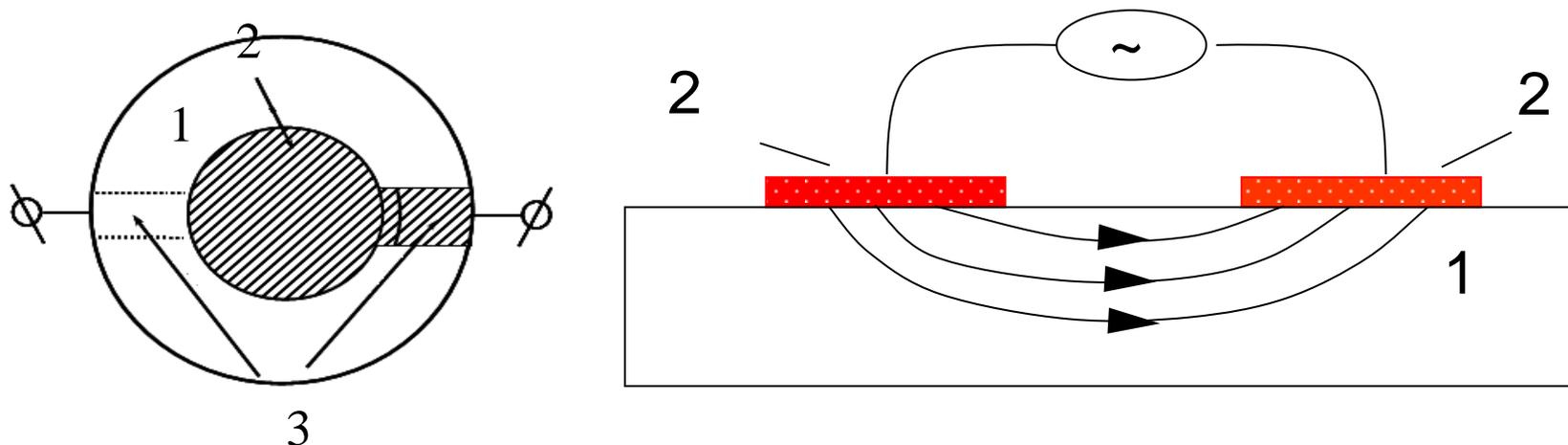


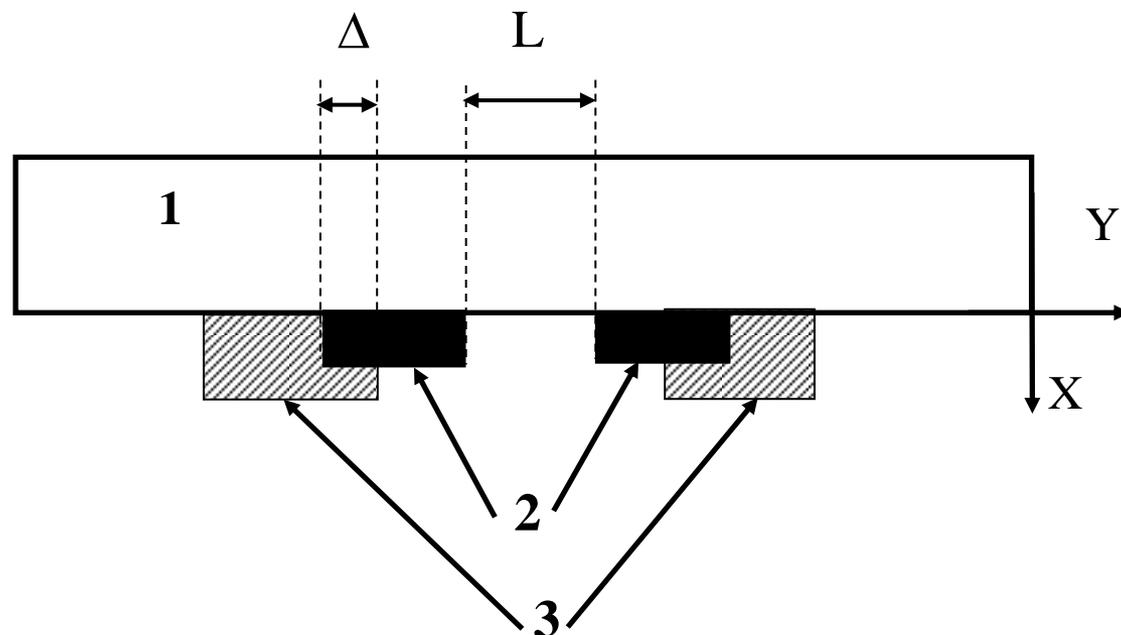
Схема резонатора с поперечным электрическим полем: 1- пьезоэлектрическая пластина, 2, 3 – электроды

**Основная трудность при конструировании резонаторов с поперечным электрическим полем это подавление нежелательных колебаний которые могут привести к полному исчезновению каких – либо резонансов.**

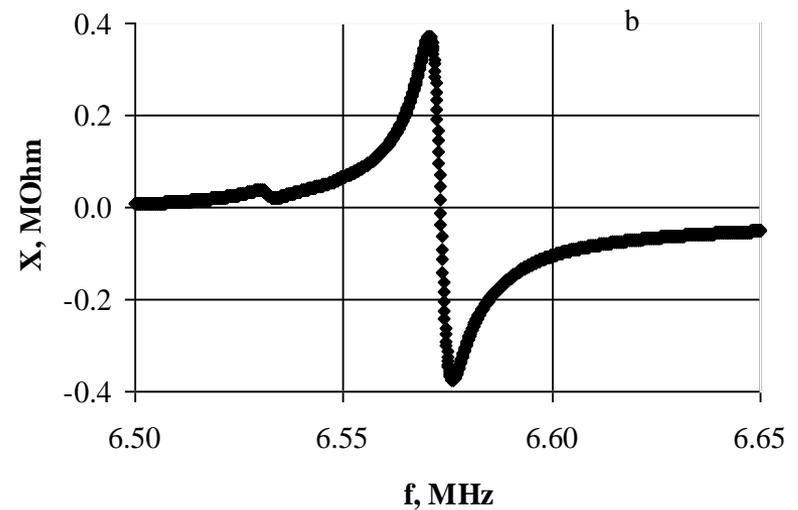
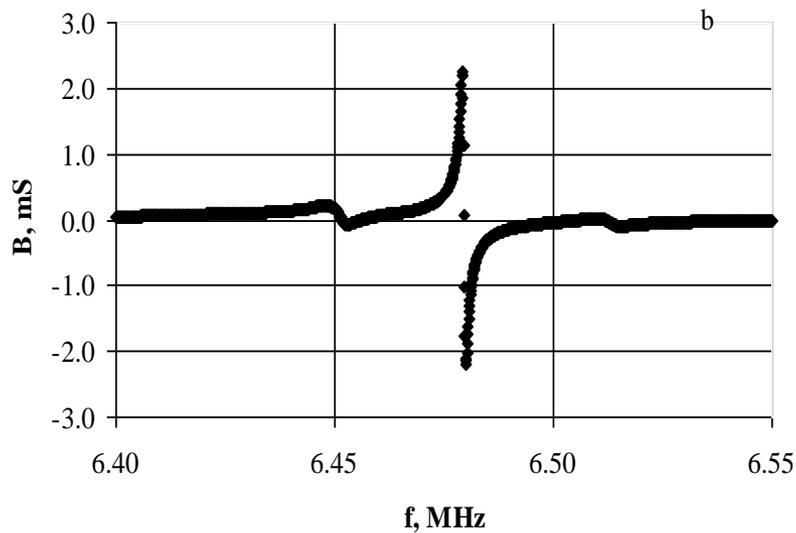
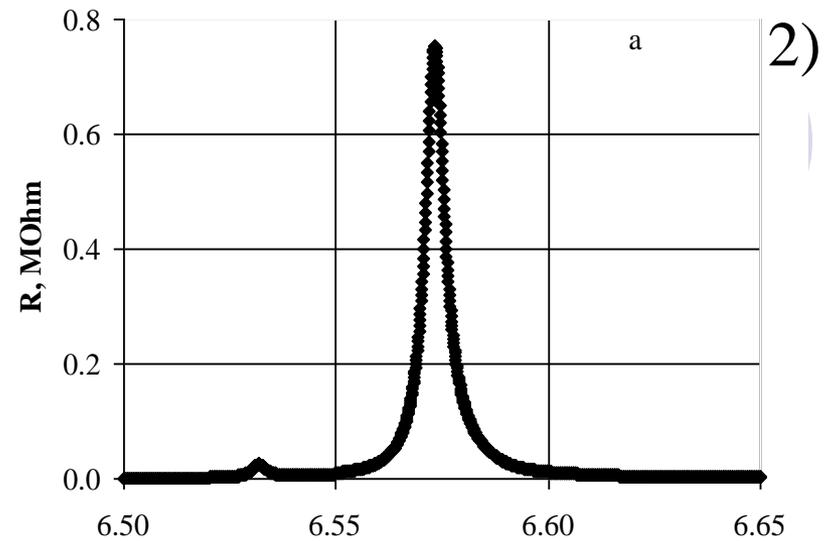
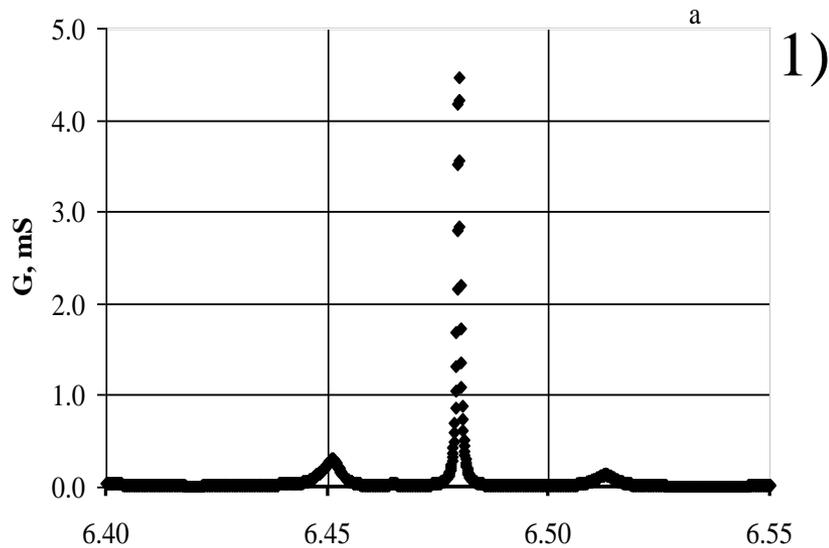
**Традиционный способ подавления нежелательных колебаний у рассматриваемых резонаторов это правильный выбор формы электродов (обычно в форме полумесяцев). Однако зависимость размеров электродов от их ориентации относительно кристаллографических осей и от поперечных размеров пластины приводит к необходимости проведения большого числа экспериментов.**

**В СФ ИРЭ РАН разработан был разработан новый способ подавления нежелательных колебаний путем нанесения на определенную часть резонатора поглощающего покрытия.**

# Резонатор с поглощающим покрытием (вид сбоку)



1- пластина ниобата лития X среза, 2 – электроды размером  $5 \times 10 \text{ мм}^2$ , 3 – поглощающее покрытие



Частотные зависимости реальной (а) и мнимой (b) частей адмиттанса (1) ( $Q = 13000$ ) и импеданса (2) ( $Q = 2000$ ) резонаторов с поглощающим покрытием

## Эксперименты показали:

изменением ширины зазора между электродами и ширины области покрытия можно менять добротность резонатора в следующих пределах:

последовательный резонанс **500 – 13000**,

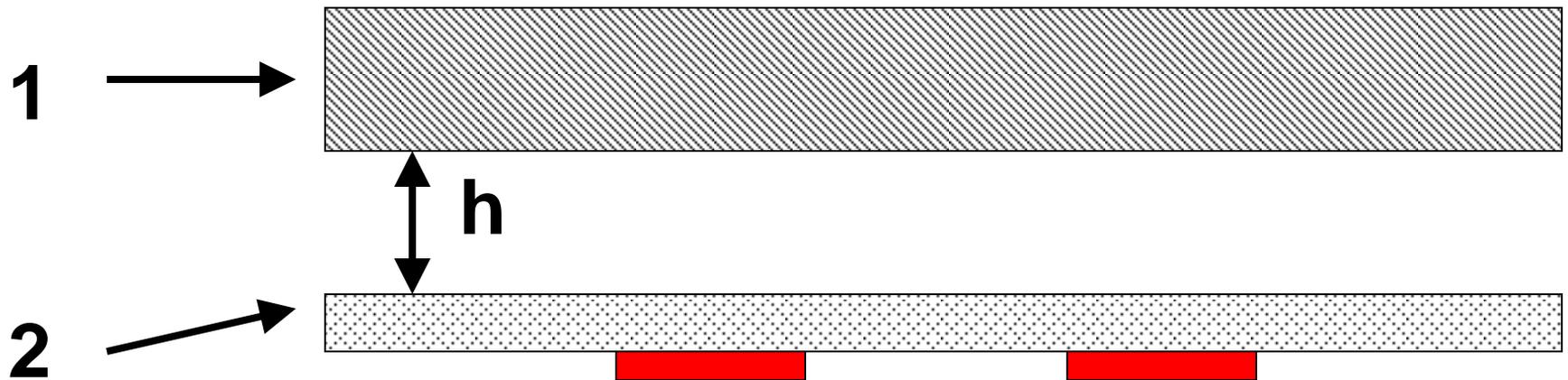
параллельный резонанс **500 – 2000**

При этом эффективный коэффициент электромеханической связи

$$K^2 = (\pi/2)^2(f_{\text{пар}} - f_{\text{посл}}) / f_{\text{пар}}$$

лежит в пределах 1 – 4%

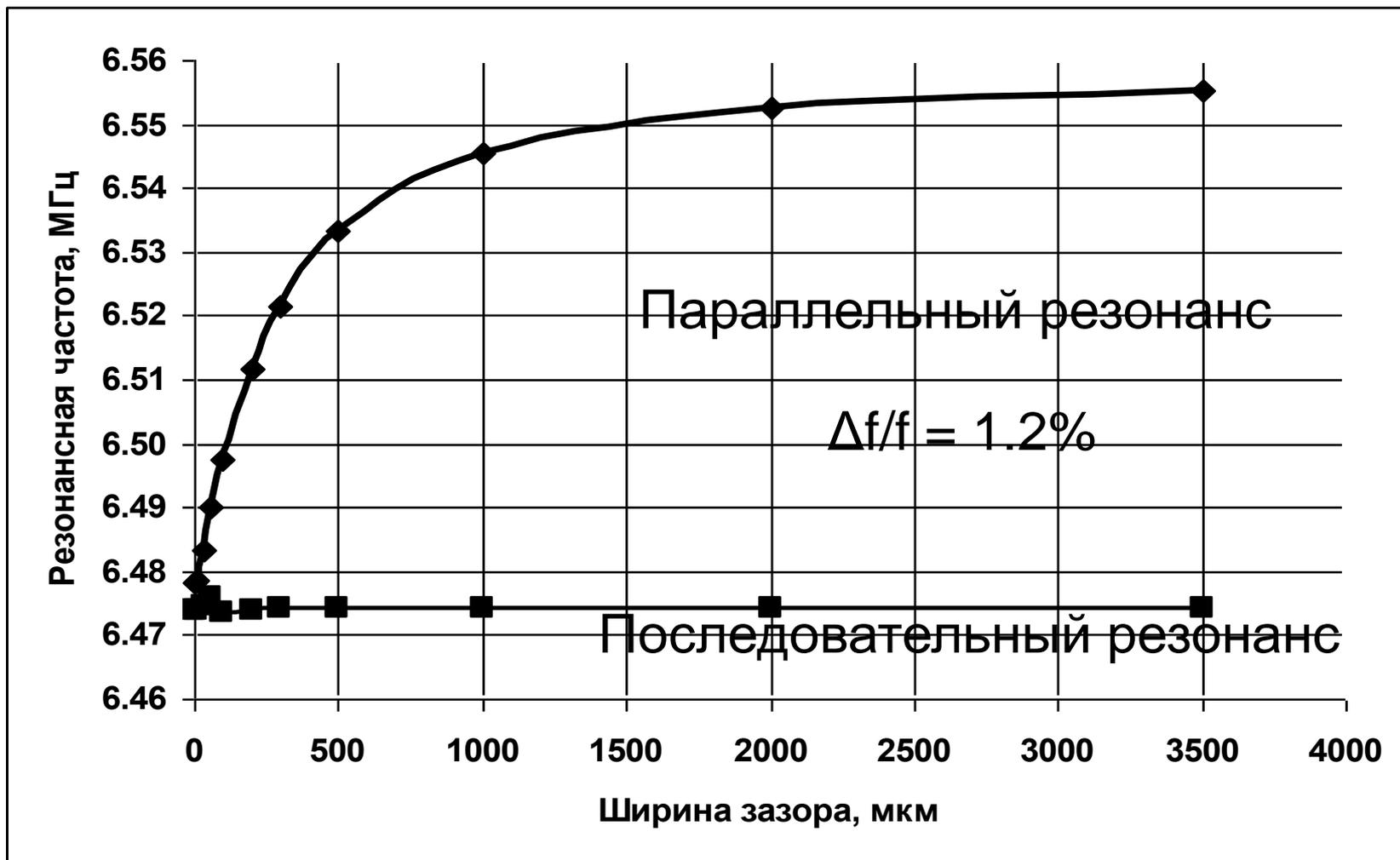
# Влияние диэлектрической или проводящей пластины на характеристики резонатора



**1** – проводящая или диэлектрическая пластина,

**2** – резонатор с поперечным полем,

**h** – зазор между резонатором и пластиной

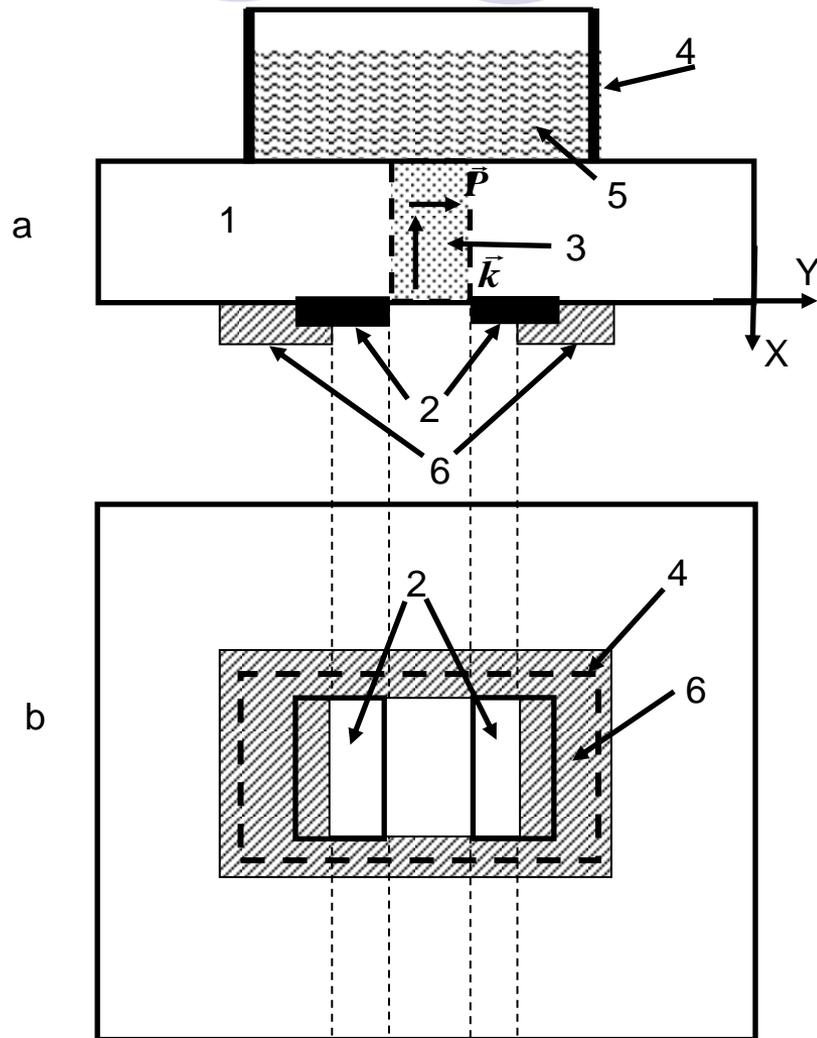


**Зависимость резонансных частот от ширины зазора между резонатором и проводящей пластиной (B.D. Zaitsev, A.M. Shikhabudinov, A.A. Teplykh, I.A. Borodina. The influence of the metal film, placed close to the free side of the piezoelectric lateral electric field excited resonator, on its characteristics, Ultrasonics, 2018, vol. 84, pp. 107-111) .**

**Последний график показывает возможность создания измерителя перемещений в диапазоне 0-2 мм с температурной компенсацией (частота последовательного резонанса не зависит от ширины зазора но зависит от температуры (470 кГц/град), который может быть использован для:**

- Непрерывного контроля деформаций элементов различных конструкций, зданий, мостов и т.д.,**
- Непрерывного контроля раскрытия трещин на этих элементах,**
- Измерения малых перемещений двух объектов друг относительно друга.**

# Датчик для анализа свойств жидкости и биообъектов



**Схема датчика:**  
**(а - вид сбоку,      b**  
**- вид сверху):**

- 1-пьезоэлектрическая пластина,
- 2- электроды,
- 3-акустический луч,
- 4-жидкостная ячейка,
- 5 – жидкость,
- 6 – демпфер

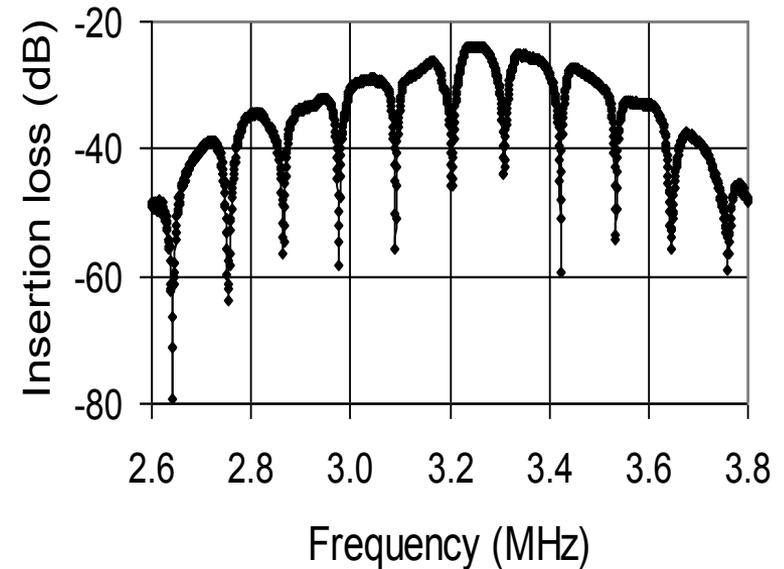
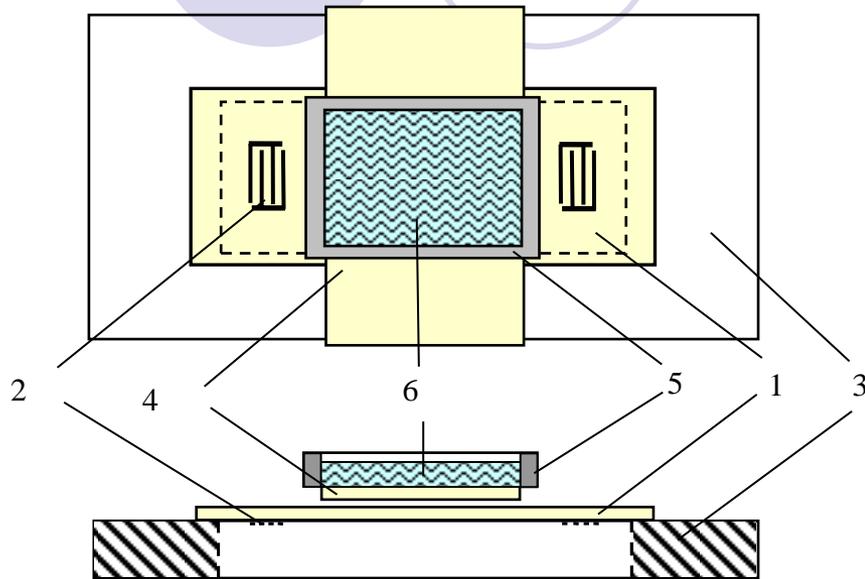


Датчик, включающий резонатор с жидкостной ячейкой и электронную схему для получения информативного сигнала, который непосредственно сопрягается с компьютером

**На основе резонатора с поперечным электрическим полем был разработан биологический датчик для обнаружения и идентификации бактериальных клеток и вирусов непосредственно в жидкой фазе, основанный на чувствительности резонатора к специфическим реакциям типа «бактериальные клетки - бактериофаги», «бактериальные клетки - антитела» и «бактериальные клетки - миниантитела» совместно с Институтом биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН (Саратов)  
Talanta, 2018, vol. 178, pp. 743–750**

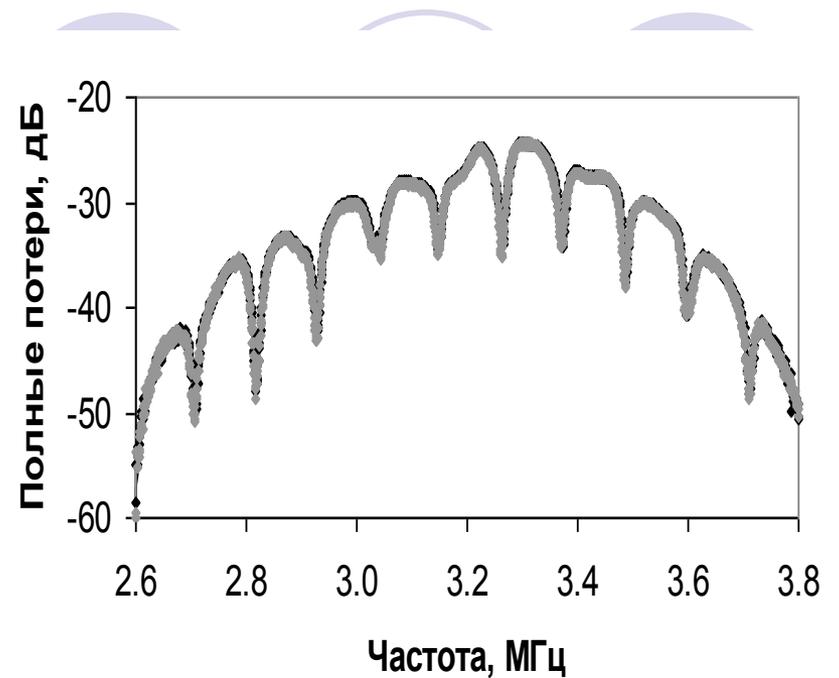
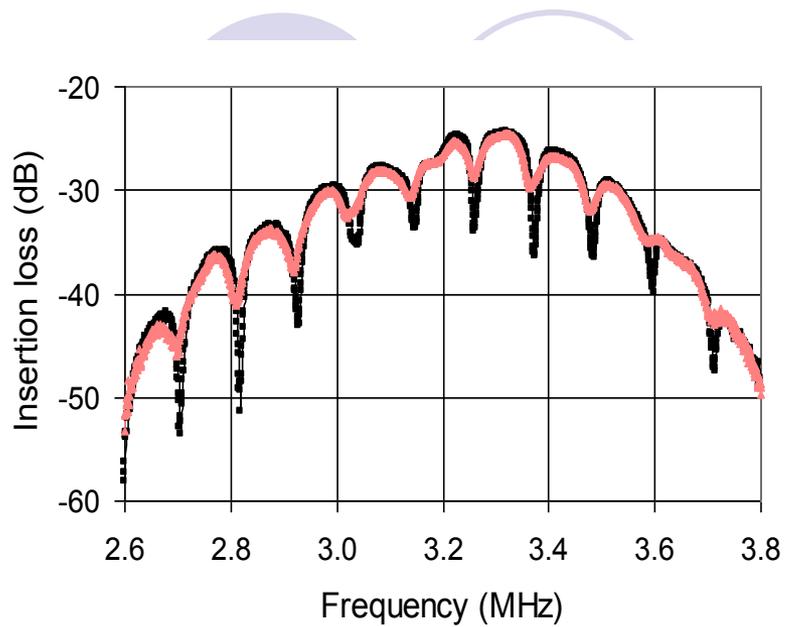
**В перспективе: модернизация датчика для определения концентрации бактерий в реальных жидкостях (кровь, моча, пищевые продукты) и определения их устойчивости к различным антибиотикам и ионам тяжелых металлов)**

# Жидкостный/биологический датчик на основе щелевой моды



**Слева-схема датчика:** 1 – пьезоэлектрическая пластина Y-X LiNbO<sub>3</sub>, 2 – встречно-штыревые преобразователи, 3 – держатель из плексигласа, 4 – пьезоэлектрическая пластина Z-X LiNbO<sub>3</sub>, 5 – жидкостный контейнер, 6 – анализируемая жидкость

**Справа-частотная зависимость полных потерь датчика с пустым контейнером.**



**Слева:** частотная зависимость полных потерь датчика, нагруженного суспензией клеток *E. coli* BL-Ril **до** (черная кривая) и **после** (розовая кривая) добавления специфичных антител.  
**Справа та же самая суспензия:** **до** (черная кривая) и **после** (серая кривая) добавления неспецифичных антител

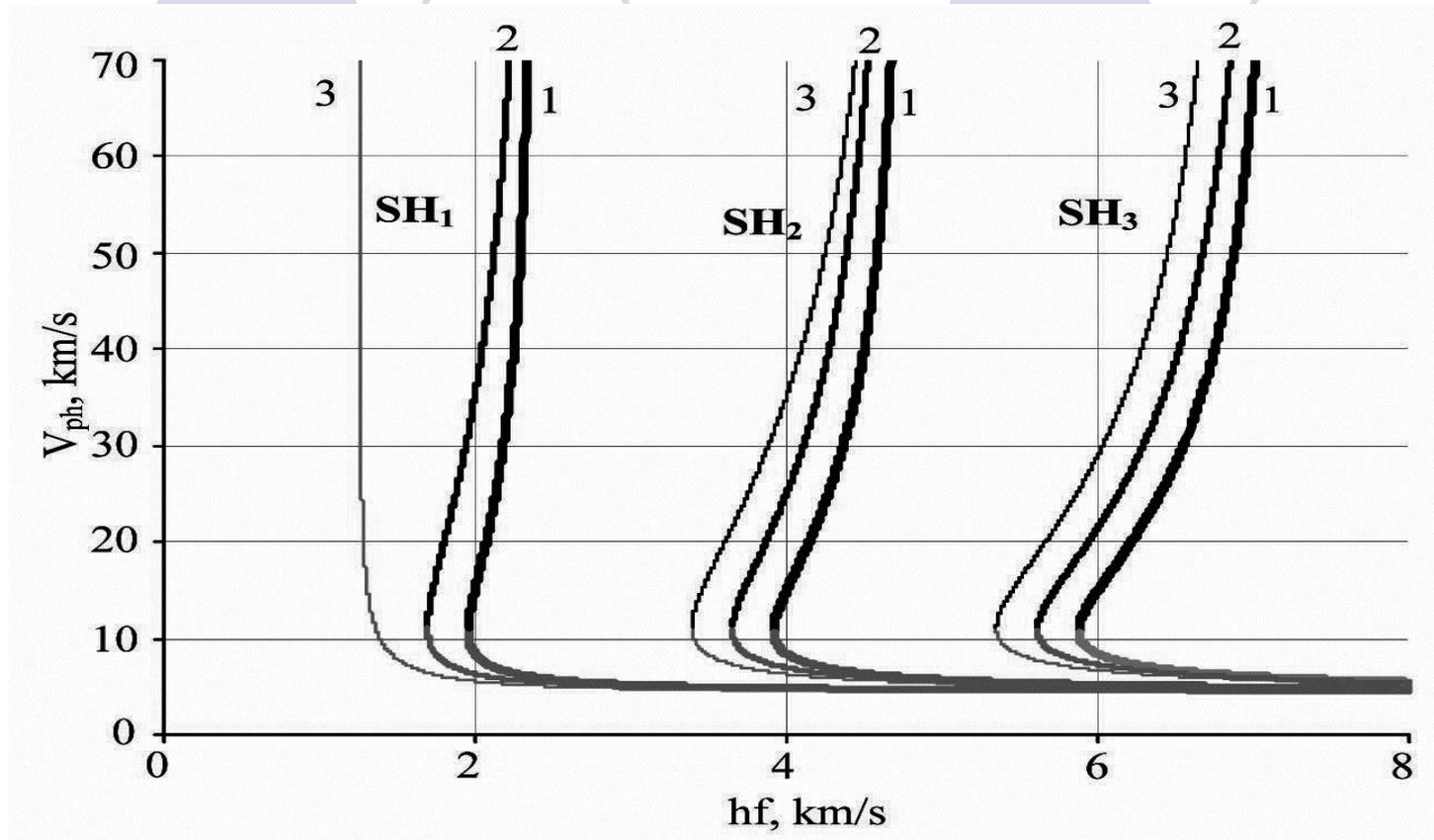
**В перспективе предполагается на основе устройства с целевой модой путем создания соответствующих образов в 20-мерном пространстве (частота и глубина 10 резонансных пиков) с помощью линейного дискриминантного анализа разработать:**

- Газовые анализаторы, для которых разработка соответствующего программного обеспечения позволит не только определять тип газа, но и его концентрацию;**
- Идентификаторы жидкостей малого объема (пищевых и технических) путем сравнения с эталоном;**
- Жидкостные датчики для одновременного измерения механических и электрических параметров жидкостей малого объема;**

**Биологические датчики для определения концентрации бактериальных клеток в реальных жидкостях;**

**Биологические датчики для определения устойчивости/восприимчивости бактериальных клеток к антибиотикам и ионам тяжелых металлов;**

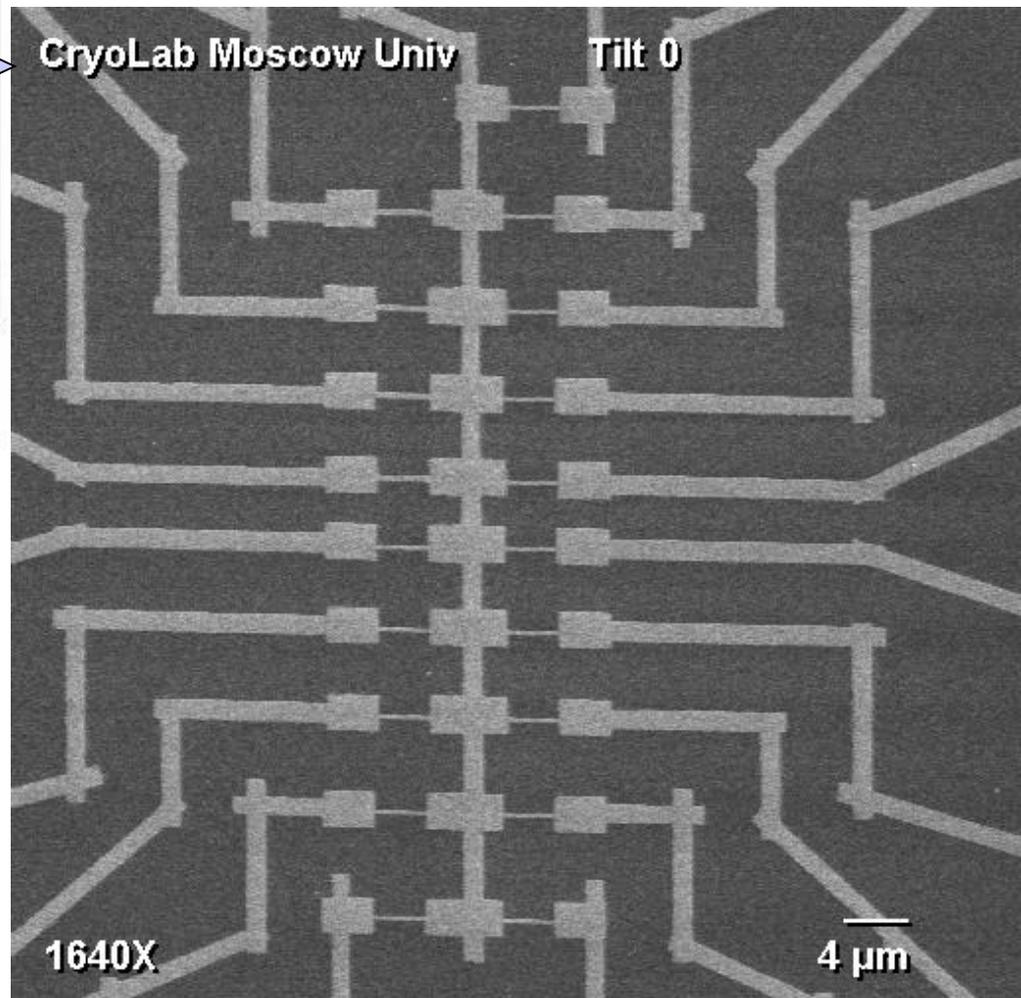
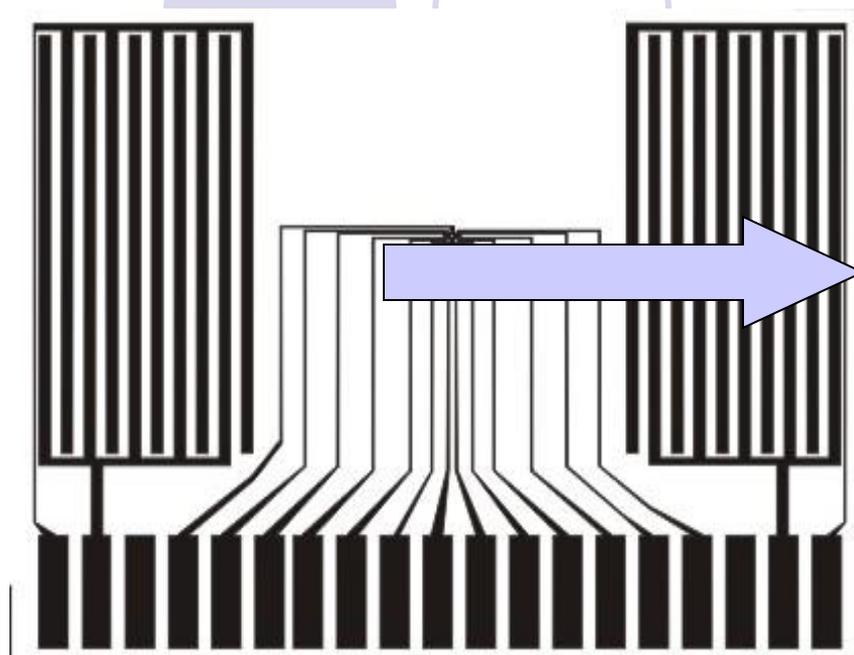
# Обратные акустические волны



**XY пластина  $\text{KNbO}_3$  (1) электрически открытая пластина, (2) электрически закороченная пластина с одной стороны, (3) – электрически закороченная пластина с двух сторон).**

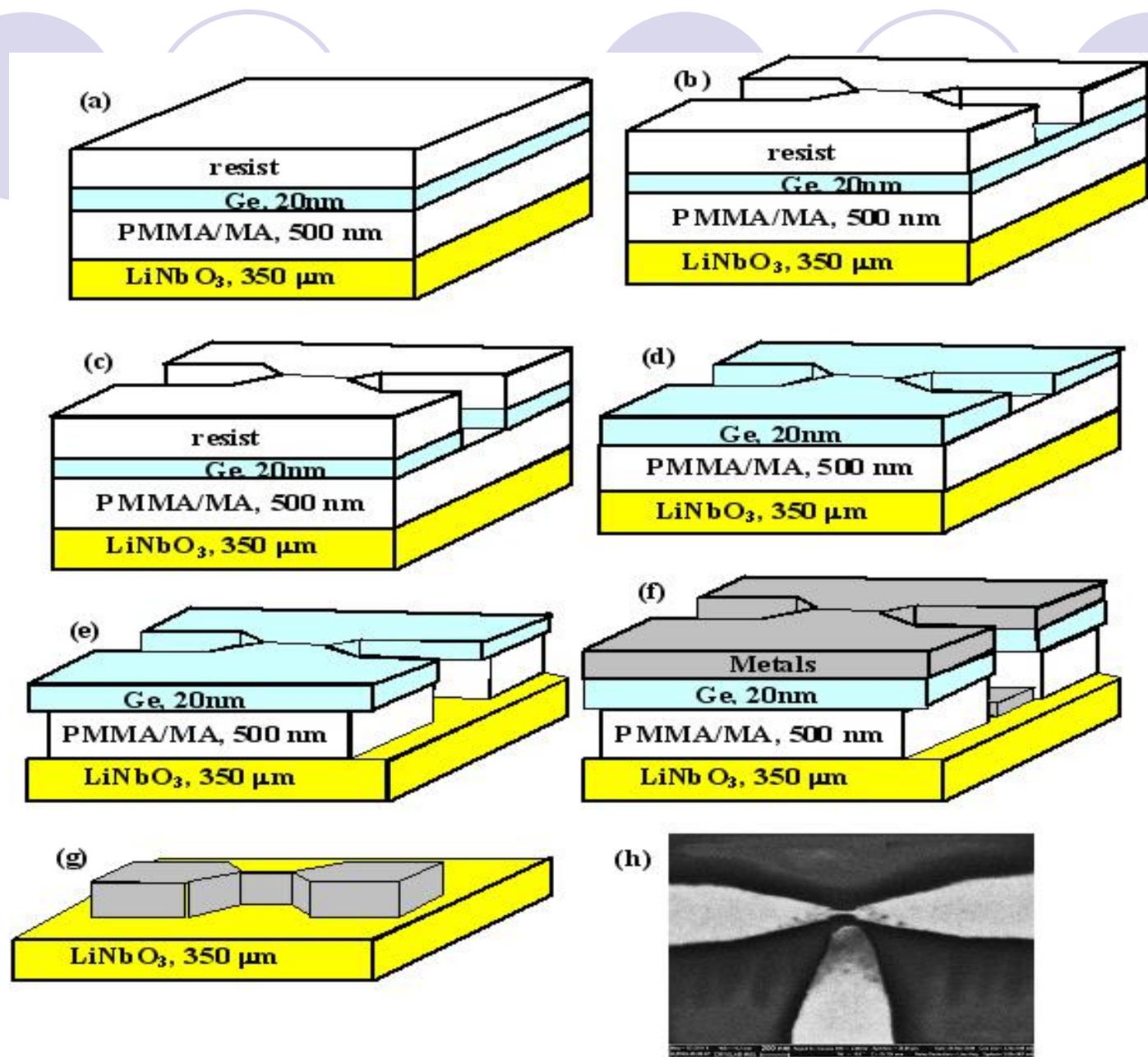
# Акусто-наноэлектронные датчики

80x80 микрон



Электронная технология ионного травления и магнетронного напыления. Засветка фоторезиста электронным лучом.

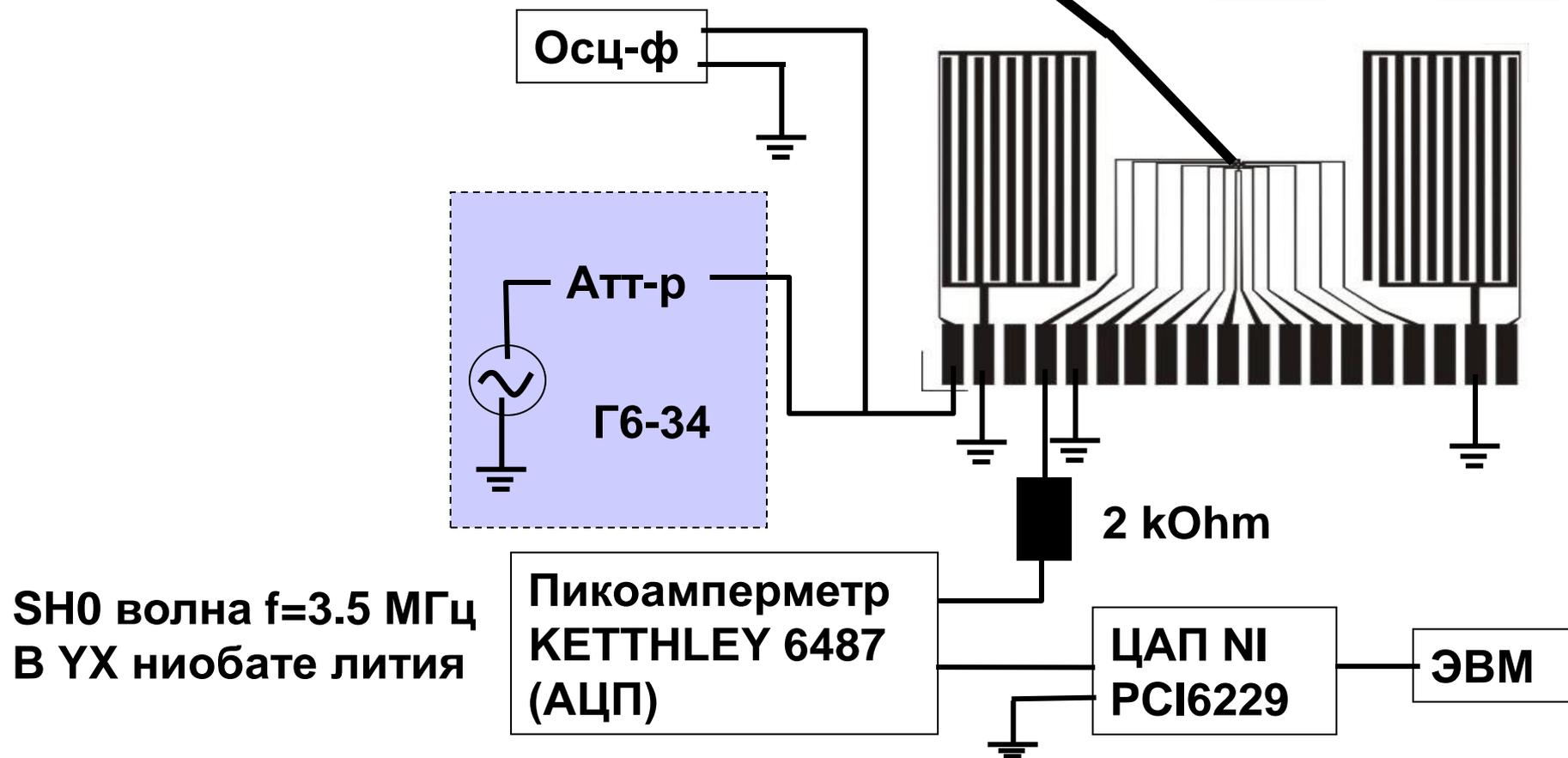
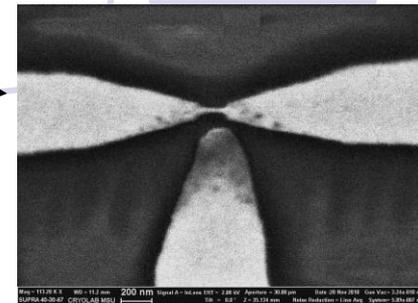
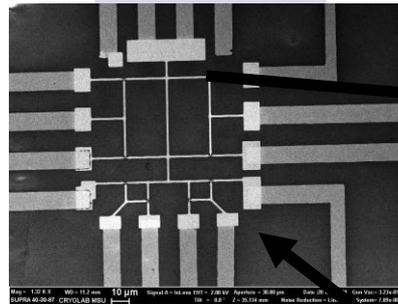
нано-литография, реактивного травления и магнетронного напыления. Засветка фоторезиста электронным лучом.



# СХЕМА ИЗМЕРЕНИЙ

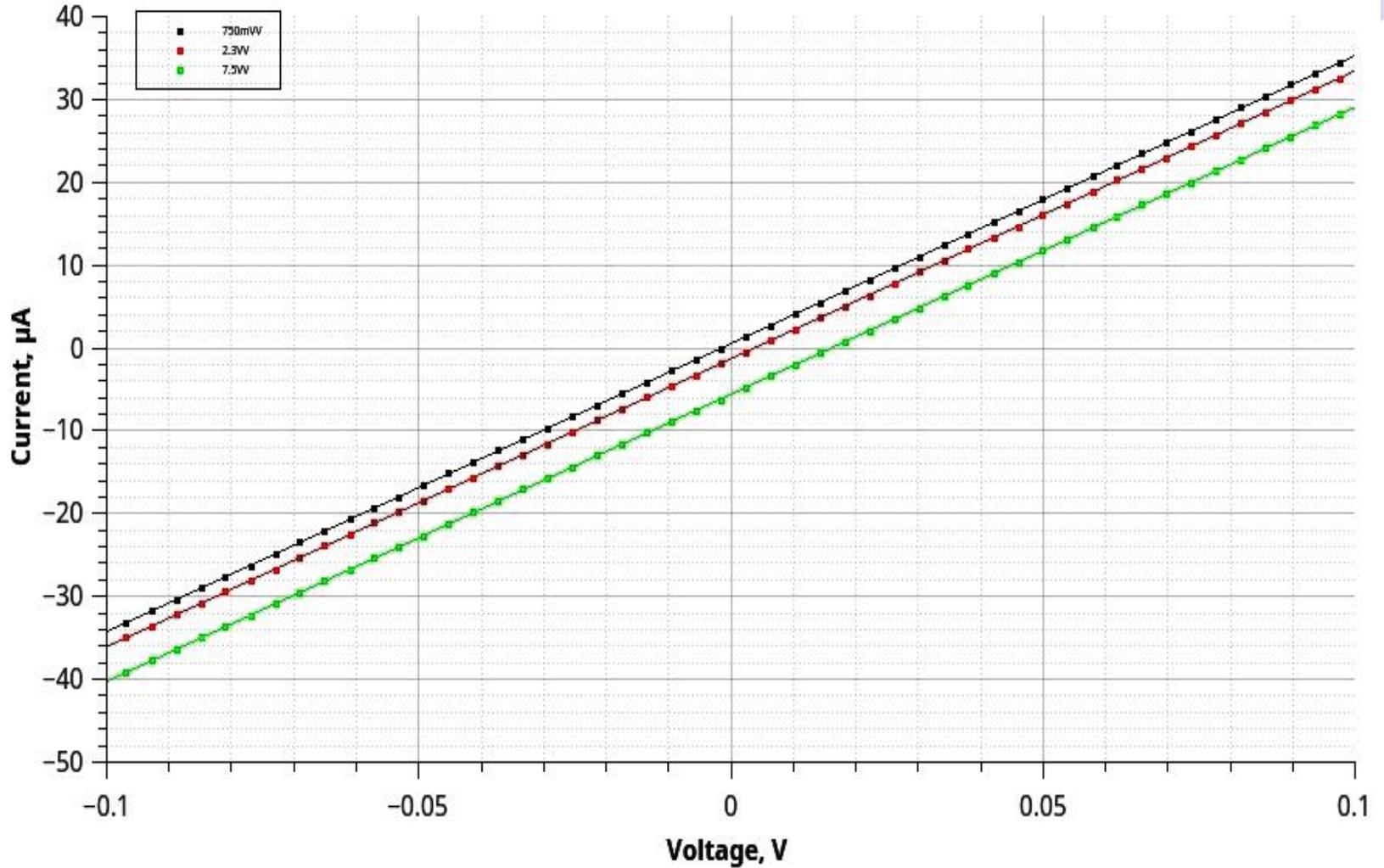
Размер  
нанопровода  
 $180 \times 20 \times 70 \text{ нм}^3$

80 мкм



SH0 волна  $f=3.5 \text{ МГц}$   
В YX ниобате лития

# Акустоэлектронный эффект



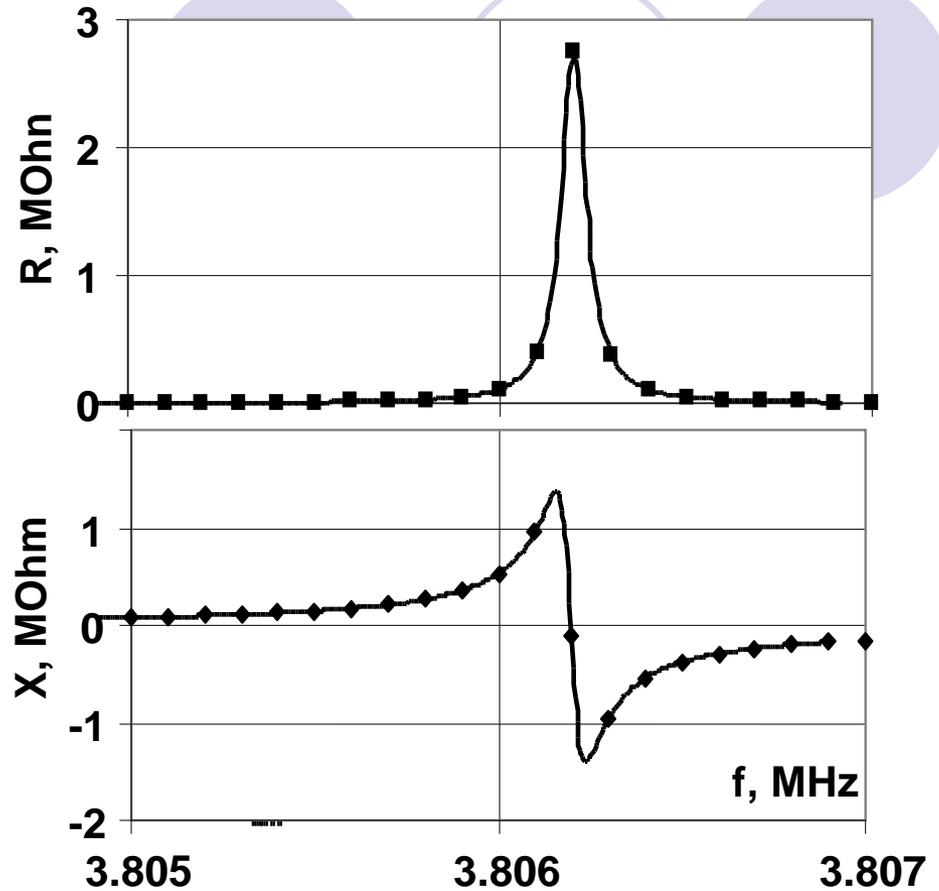
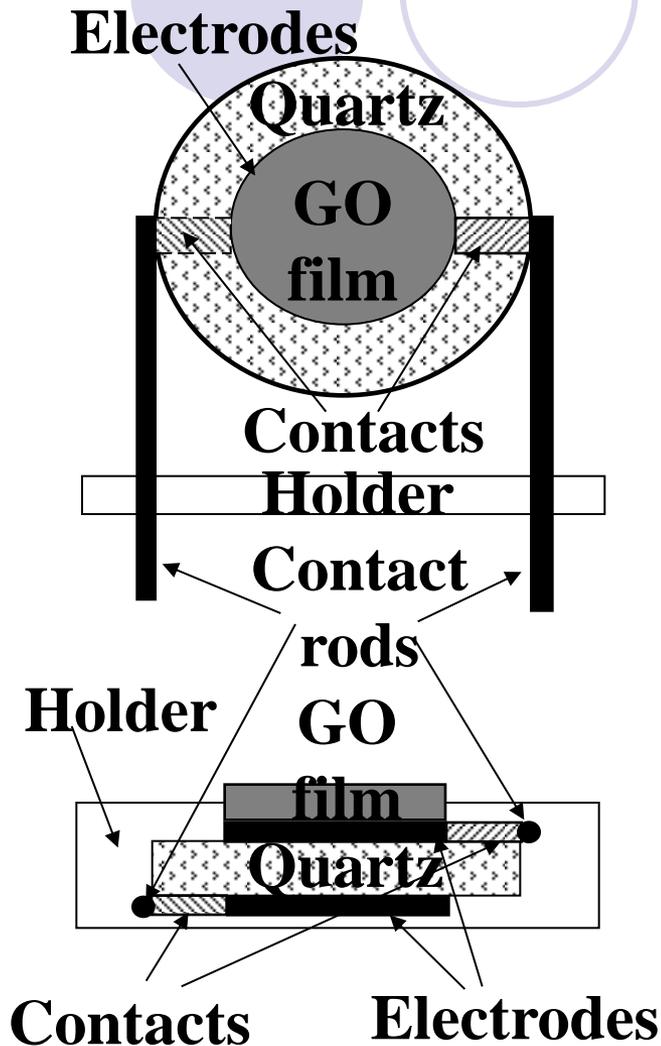
# Исследование свойств новых материалов

**Нанокompозитные полимерные материалы  
на основе полиэтиленовой матрицы с  
внедренными наночастицами металлов и  
их оксидов**

**Их использование в качестве согласующих слоев  
увеличивает эффективность излучения  
ультразвука в жидкость и газ в два раза**

**Ultrasonics 2008(48) 587; TUFFC 2010(57) 2099; JAP 2013(113) 224507;  
Патент РФ №126824 от 10.04.2012**

# Акустические свойства ОГ



С11 пленки ОГ – 12.3 МПа  
С44 пленки ОГ – 3 МПа  
Плотность  $\sim 850 \text{ kg/m}^3$ .  
Толщина пленки – 1.5 мкм

# Направления работ

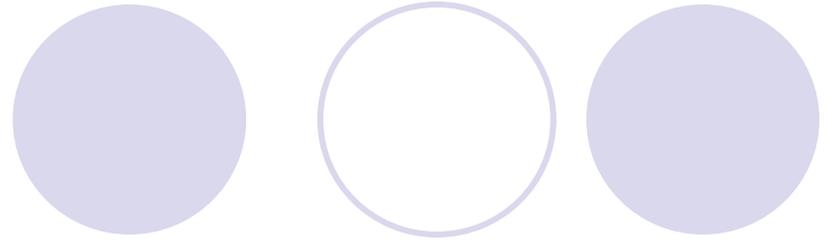
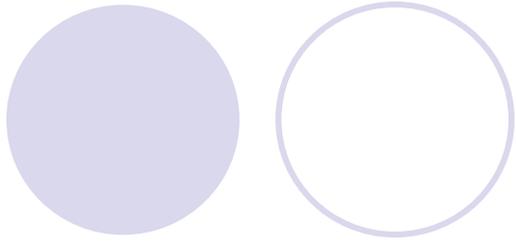


- продолжение исследований фундаментальных свойств акустических волн в пьезоэлектрических материалах и структурах на их основе.
- продолжение работ по поиску и анализу применимости новых материалов для химических и физических датчиков.
- работы по совмещению принципов акусто- и наноэлектроники для создания гибридных датчиков.
- разработка гибких сенсорных устройств

# Финансирование работ



- Госзадание ИРЭ
- РНФ 15-19-20046
- РНФ 18-49-08005 (Россия-Тайвань)
- РНФ 19-79-00173
- РФФИ 17-307-50007, 17-07-00750,
- 18-29-23042, 19-07-00070, 19-07-00145,  
20-37-70021



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**