



# Зондовая микроскопия: методы, теория, приложения

Лекция 2: как всё работает

---

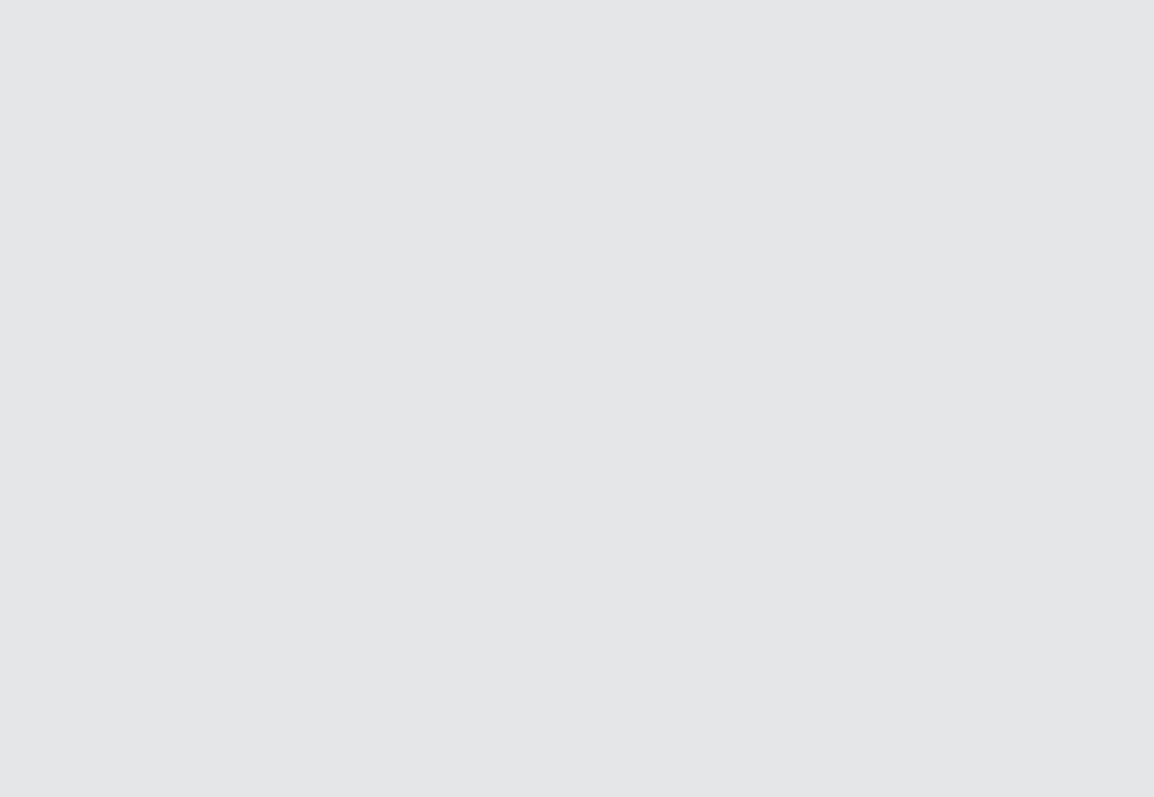
О.В. Синицына, Г.Б. Мешков, Я.В. Гиндикин

26 февраля 2018г

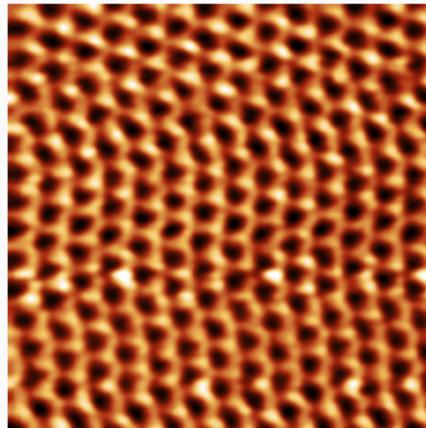
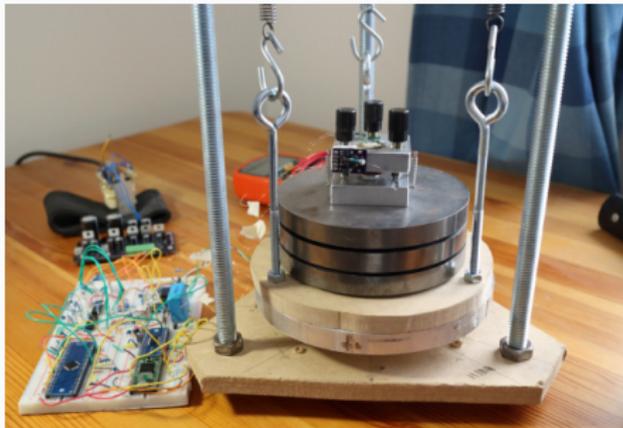
Московский государственный университет  
Факультет наук о материалах

# Работа СТМ глазами электронного микроскопа

Частицы Pb на Ru. Область сканирования  $5\mu\text{m}$ .



# DIY \$100 STM

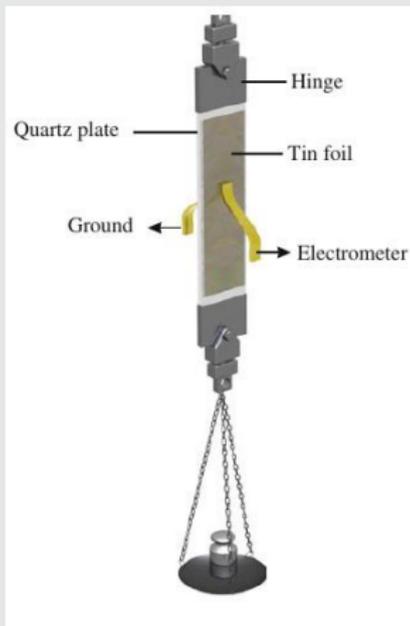


Как собрать СТМ у себя дома:

<https://dberard.com/home-built-stm/>

# Пьезоэффект

## Открытие пьезоэффекта

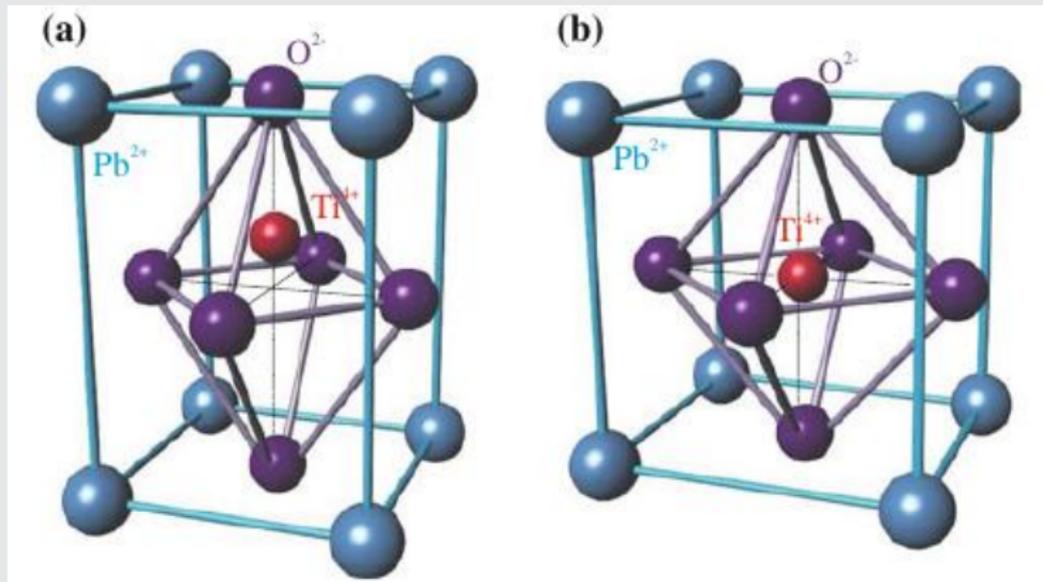


## Братья Кюри, 1880 г.

Первоначально открыт на кристаллах кварца. При деформации пьезоэлектрика в элементарной ячейке возникает дипольный момент, и, как следствие, появляется заряд на поверхности и электрическое поле внутри вещества. Необходимое условие пьезоэффекта: отсутствие центра инверсии в элементарной ячейке.

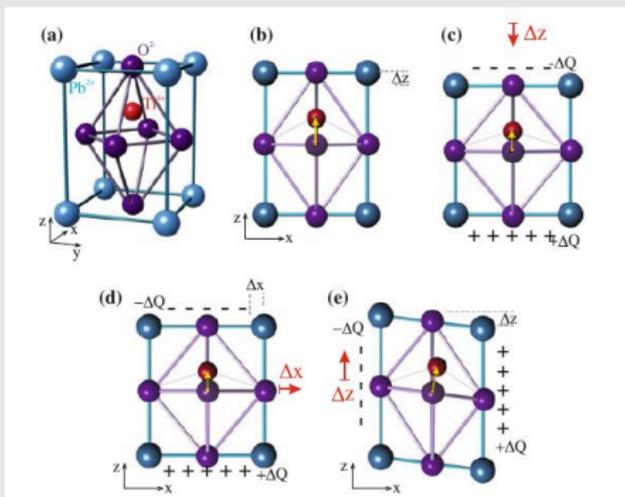
# Пьезоэффект

Пьезокерамика: цирконат-титанат свинца ( $Pb[Zr_xTi_{1-x}]O_3$ )



# Пьезоэффект

## Прямой пьезоэффект

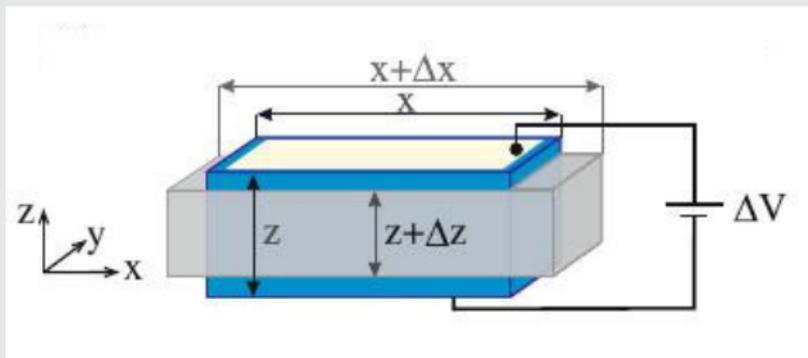


## Типы пьезоэффекта:

- (с) продольный
- (d) поперечный (за счет эффекта Пуассона)
- (е) сдвиговой

# Пьезоэффект

## Константы обратного пьезоэффекта



Механическая деформация:  $S_1 = \Delta x/x$ ,  $S_3 = \Delta z/z$ .

Пьезоэлектрические коэффициенты:  $d_{33} = \frac{S_3}{\mathcal{E}_3}$ ,  $d_{31} = \frac{S_1}{\mathcal{E}_3}$ .

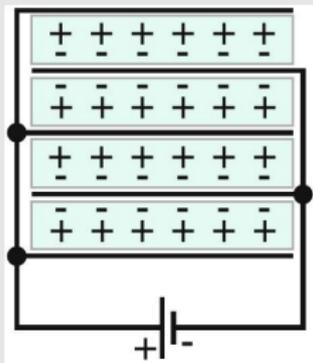
Константа пьезоэффекта:  $\frac{\Delta z}{\Delta V} = \frac{\Delta z/z}{\Delta V/z} = \frac{S_3}{\mathcal{E}_3} = d_{33}$ .

Продольная константа  $\frac{\Delta z}{\Delta V}$  **НЕ ЗАВИСИТ ОТ ТОЛЩИНЫ** образца z.

А поперечная  $\frac{\Delta x}{\Delta V} = \frac{\Delta x/x}{\Delta V/z} \frac{x}{z} = \frac{S_1}{\mathcal{E}_3} \frac{x}{z} = d_{31} \frac{x}{z}$  зависит.

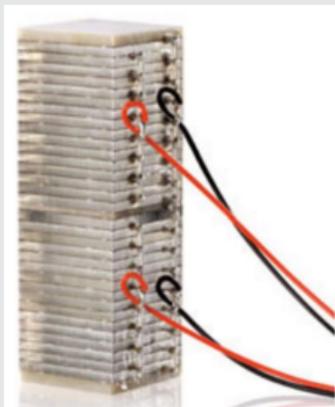
# Пьезоэффект

Пьезостек



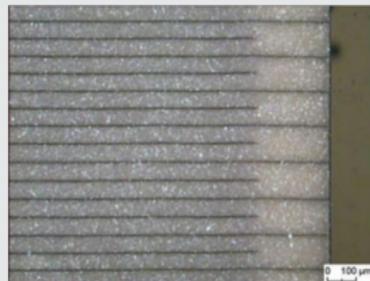
$$\Delta z = \sum_i \Delta z_i$$

Склеенный стек



$$\Delta z_i \approx 1\text{mm}, V \approx 10^3\text{V}$$

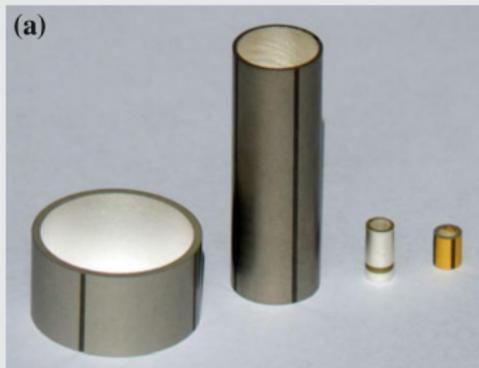
Монолитный стек



$$\Delta z_i \approx 60\mu\text{m}, V \approx 10^2\text{V}$$

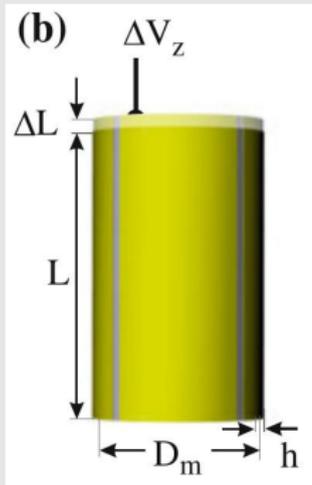
# Пьезоэффект

## Пьезотрубки



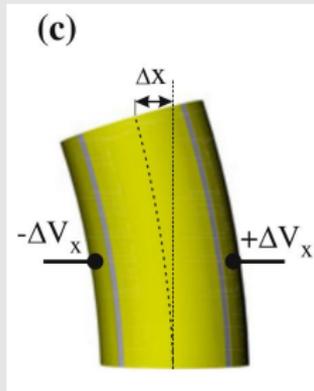
Наиболее популярный элемент пьезоактуаторов. Обеспечивает перемещение в трех ортогональных направлениях.

## Вертикальное перемещение



$$\frac{\Delta z}{\Delta V} = d_{31} \frac{L}{h}$$

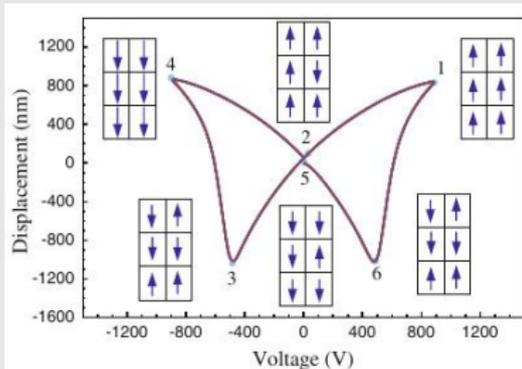
## Латеральное перемещение



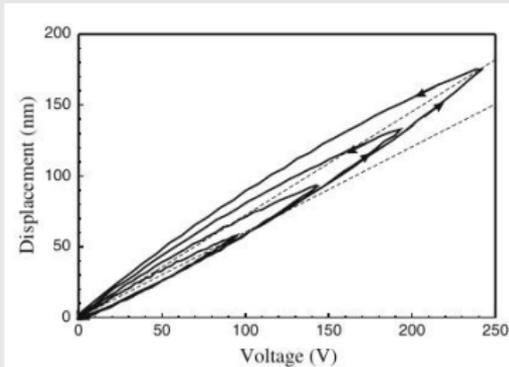
$$\frac{\Delta x}{\Delta V} = \frac{d_{31} L^2}{D_m h}$$

# Пьезоэффект

## ”Бабочка гистерезиса“

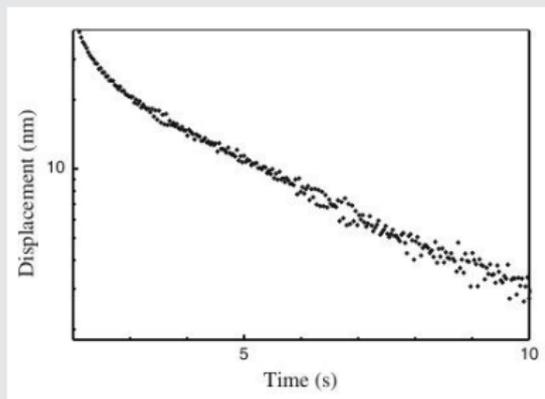


## Гистерезис в рабочей области



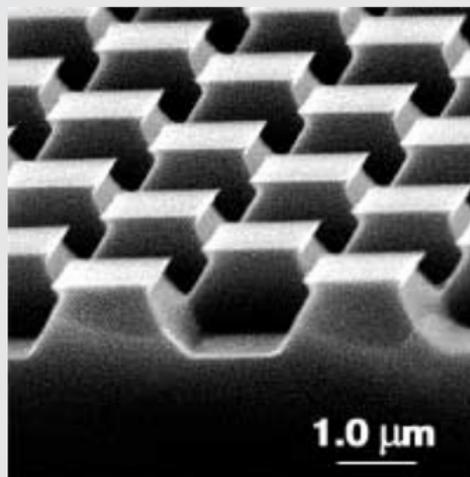
# Пьезоэффект

## Крип

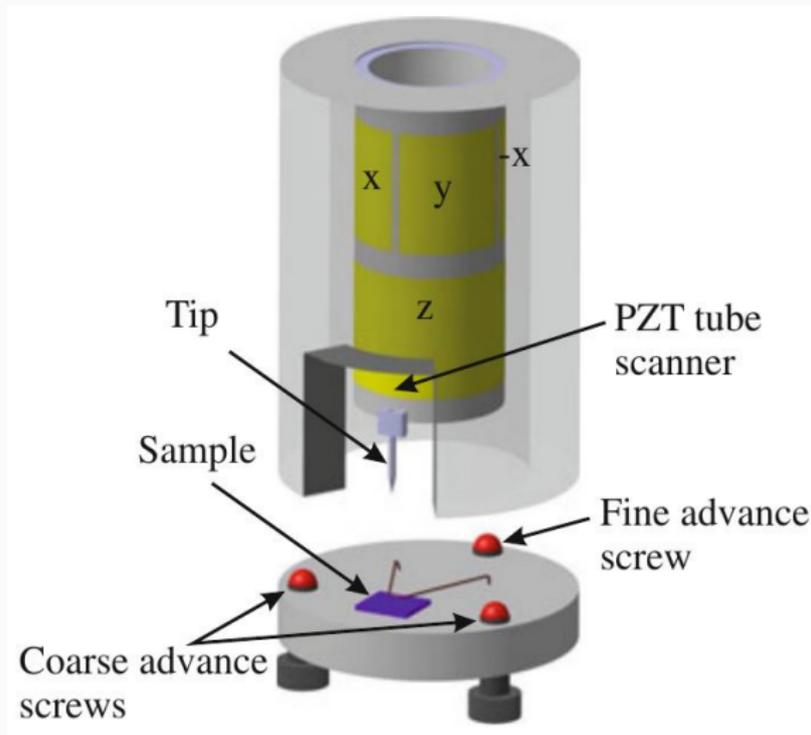


И температурный дрейфт!

## Калибровочная решетка

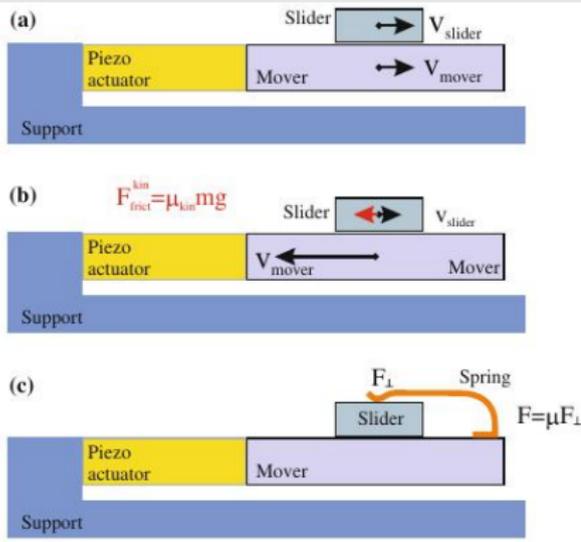


# Наноскоп: первый коммерчески доступный СЗМ

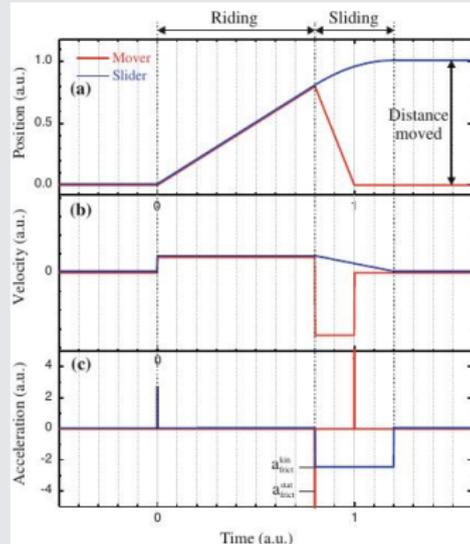


# Пьезоактюаторы

## Инерционный слайдер

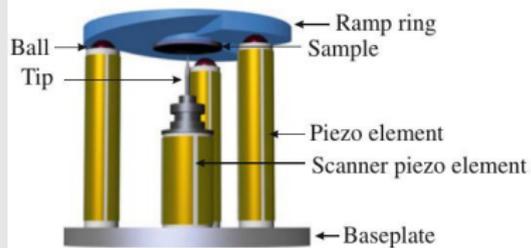


## Кинематика скольжения

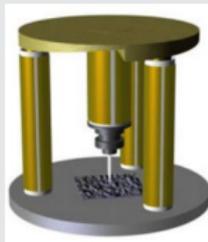


# Микроскопы на основе инерционного слайдера

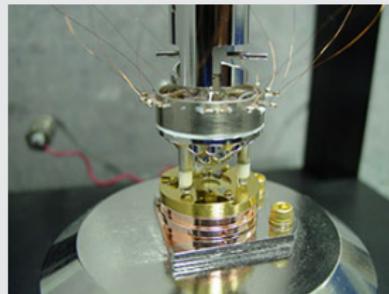
## Beetle



## Johnny Walker



## Beetle STM

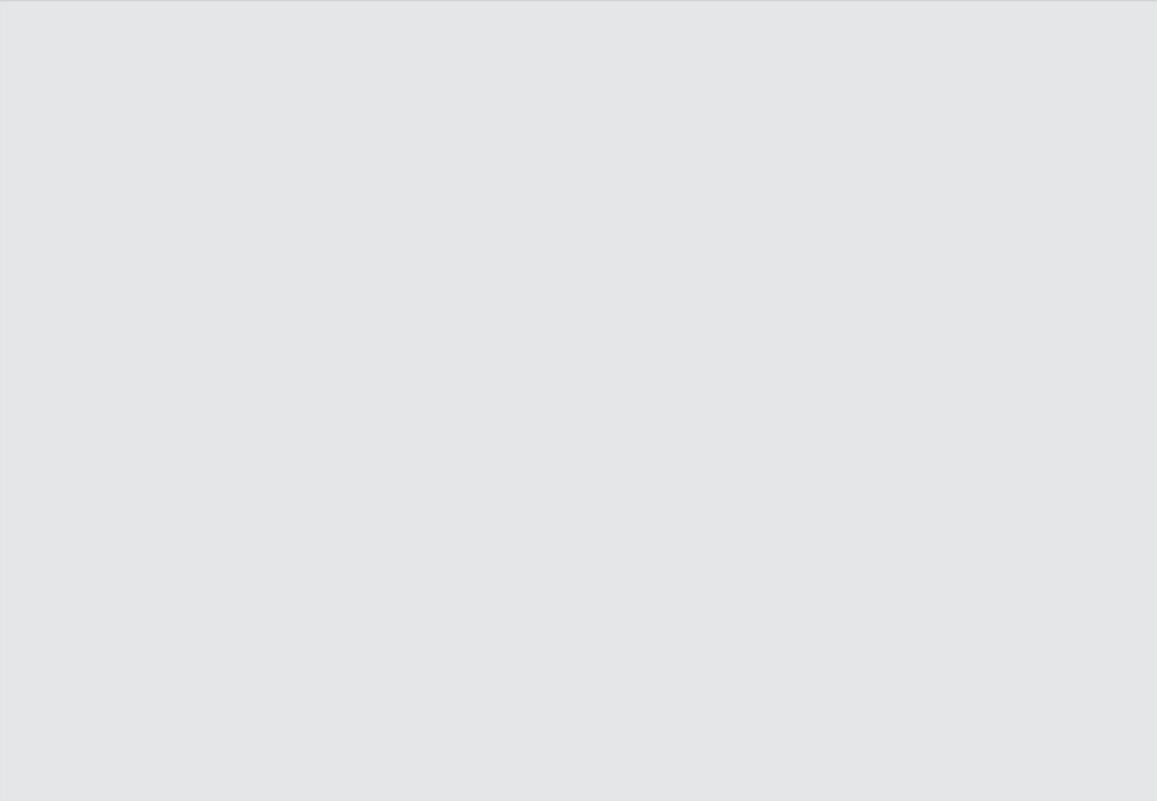


# Привод "Коала"

## Принцип действия

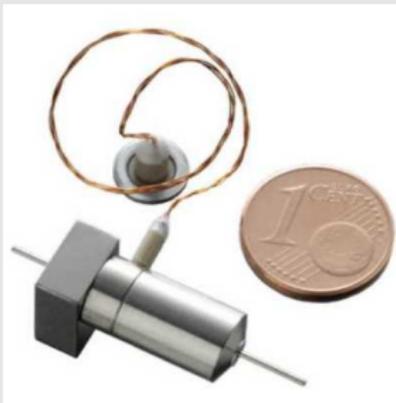
# Привод "Коала"

"Коала" в дикой природе

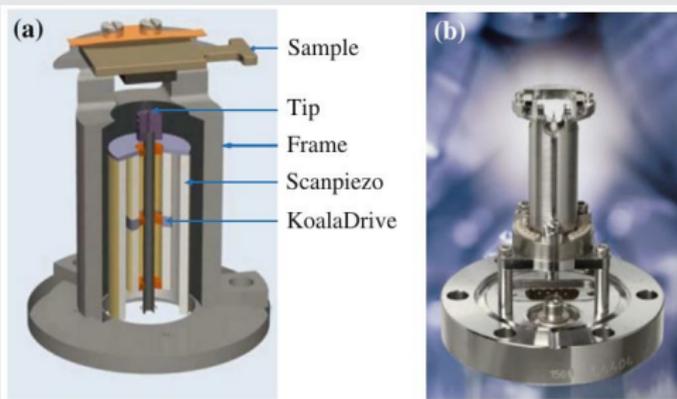


# Привод "Коала"

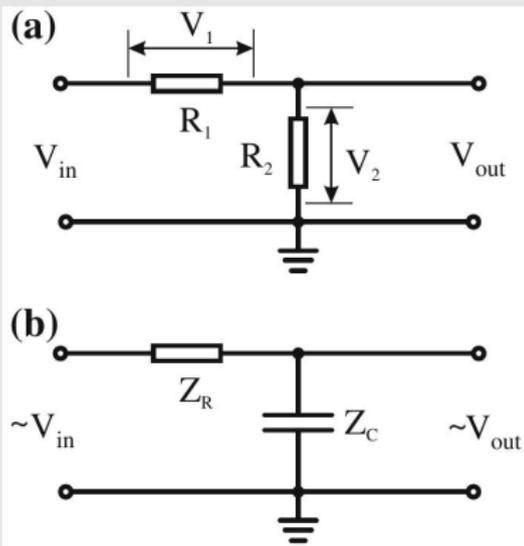
## Собственно привод



## Микроскоп на его основе



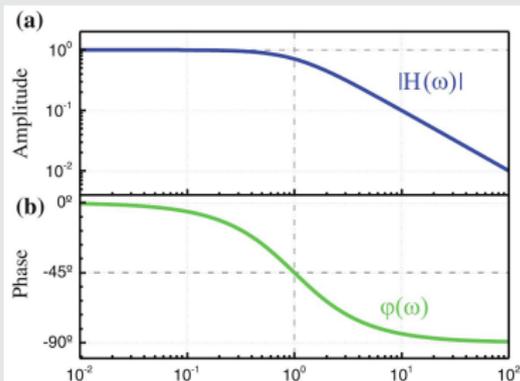
Делитель напряжения (а)  
и фильтр нижних частот (б)



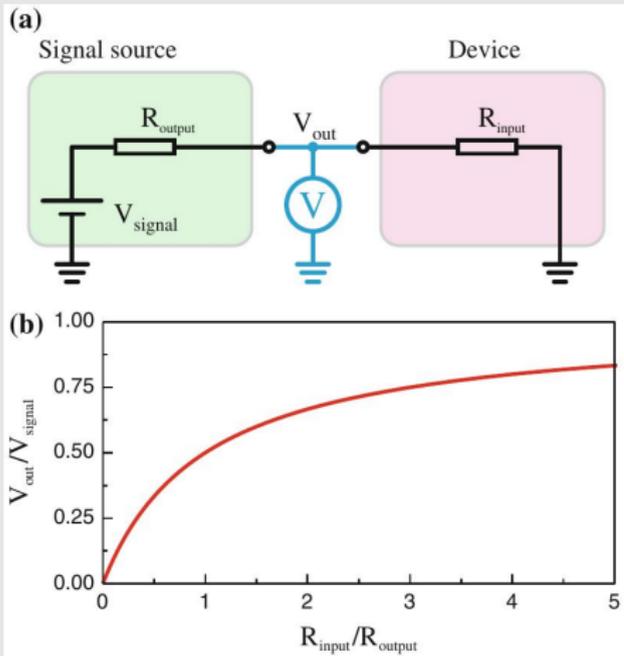
Коэффициент передачи

$$H_a = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$H_b(\omega) = \frac{Z_C I}{(Z_R + Z_C) I} = \frac{1}{1 + i\omega RC}$$



## Источник/приемник сигнала



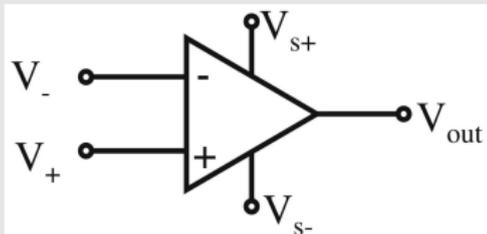
## Входной/выходной импеданс

$$V_{\text{out}} = V_{\text{signal}} \frac{R_{\text{input}}}{R_{\text{input}} + R_{\text{output}}}$$

Как добиться, чтобы  
 $R_{\text{output}} \ll R_{\text{input}}$ ?

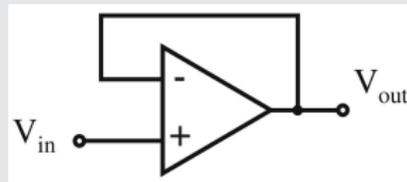
Нужен преобразователь  
импеданса на основе  
операционного усилителя.

## Операционный усилитель



- Огромное  $R_{input}$
- Пикоамперный входной ток
- Низкое  $R_{output}$  (Омы)
- Коэффициент усиления с разомкнутой петлей  $G \approx 10^4 - 10^6$
- $V_{out} = G(V_+ - V_-)$

## Повторитель напряжения



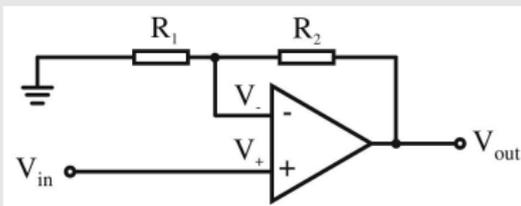
$$V_{out} = G(V_{in} - V_{out})$$

$$V_{out} = V_{in} \frac{G}{G+1} \approx V_{in}$$

## Золотое правило:

- $I_{input} \rightarrow 0$
- $V_+ - V_- \rightarrow 0$

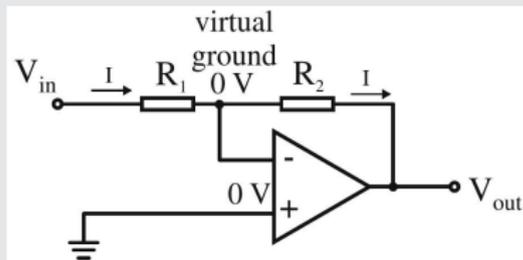
## Неинвертирующий усилитель



$$V_{out} = G(V_{in} - HV_{out})$$

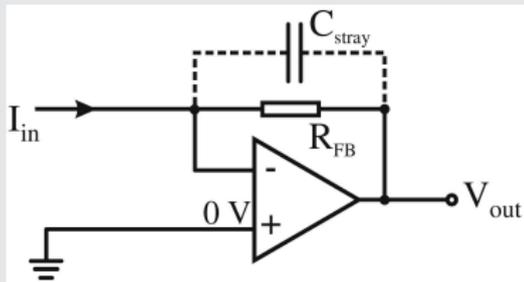
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

## Инвертирующий усилитель



$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-IR_2}{IR_1} = -\frac{R_2}{R_1}$$

## Усилитель тока



$$V_{\text{out}} = -I_{\text{in}} Z_{\text{FB}}$$

$$Z_{\text{FB}}^{-1} = R_{\text{FB}}^{-1} + i\omega C_{\text{stray}}$$

$$V_{\text{out}} = \frac{-I_{\text{in}} R_{\text{FB}}}{\sqrt{1 + (\omega R_{\text{FB}} C_{\text{stray}})^2}}$$

## Оценки

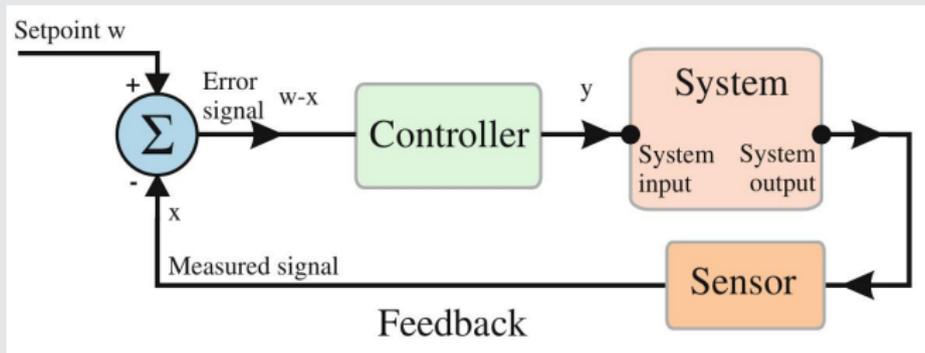
$$I_{\text{in}} \approx 0.01 \dots 10 \text{ nA}$$

$$R_{\text{FB}} = 1 \text{ G}\Omega \rightarrow V_{\text{out}} \approx 1 \text{ B}$$

$$\text{При } C_{\text{stray}} \approx 0.1 \text{ pF}$$

$$\omega_c = \frac{1}{R_{\text{FB}} C_{\text{stray}}} \approx 1.5 \text{ kHz}$$

## Контроллер обратной связи



Пропорциональный контроллер:  $y = K_P(w - x)$

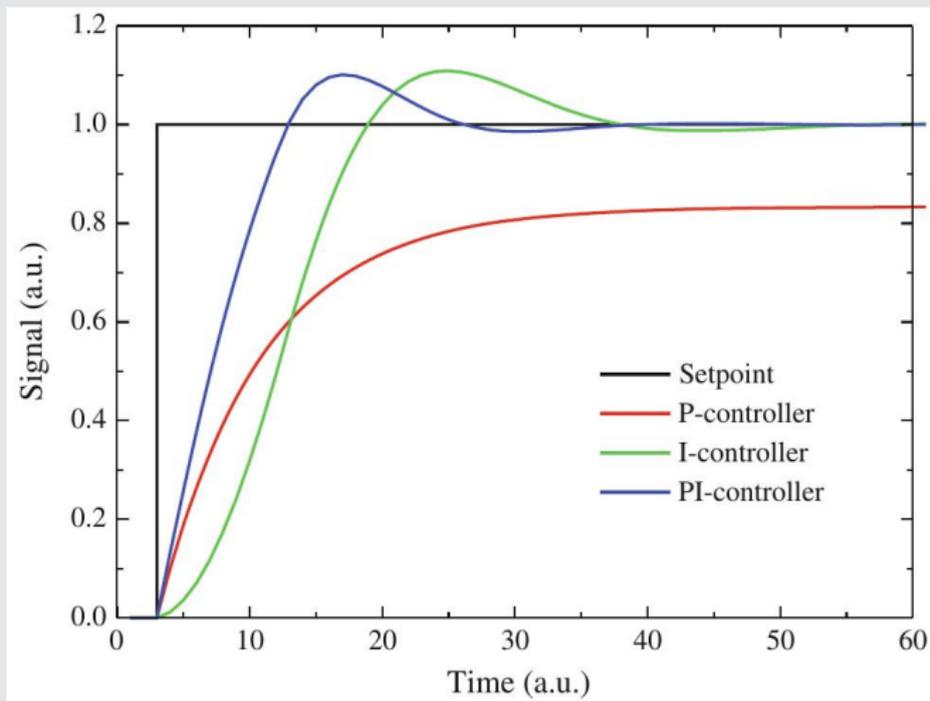
Инвертирующий усилитель:  $K_P = -R_2/R_1$

Интегральный контроллер:  $y(t) = K_I \int_0^t (w - x(\tau)) d\tau$

Пропорционально-интегральный контроллер:

$$y(t) = K_P(w - x(t)) + K_I \int_0^t (w - x(\tau)) d\tau$$

## Отклики различных контроллеров на ступенчатое возмущение



# Задачи

- Выведите константы пьезоэффекта для вертикального и латерального перемещения пьезотрубки.
- Нарисуйте схему фильтра верхних частот и постройте его диаграмму Боде.
- Выведите коэффициент усиления неинвертирующего усилителя.
- Нарисуйте схему интегратора на операционном усилителе.



W. Heywang, K. Lubitz, and W. Wersing.

***Piezoelectricity: Evolution and Future of a Technology.***

Springer, 2008.



P. Horowitz and W. Hill.

***The Art of Electronics.***

Cambridge University Press, 2015.



B. Voigtländer.

***Scanning probe microscopy: Atomic force microscopy and scanning tunneling microscopy.***

Springer, 2015.