

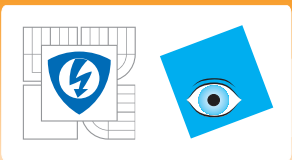
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Kvantové etalony v metrologii elektrických veličin

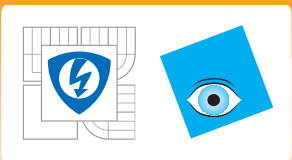
Mgr. Martin Šíra, Ph.D. (ČMI, Brno)

červen 2012

Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



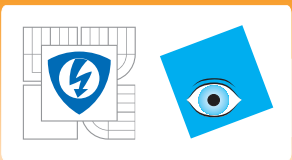
veličina: napětí
jednotka: volt (V)



Historie jednotky

Jednotka mezinárodně ustanovena r. 1880.

Definice: rozdíl potenciálů na vodiči, který disipoval jeden watt.

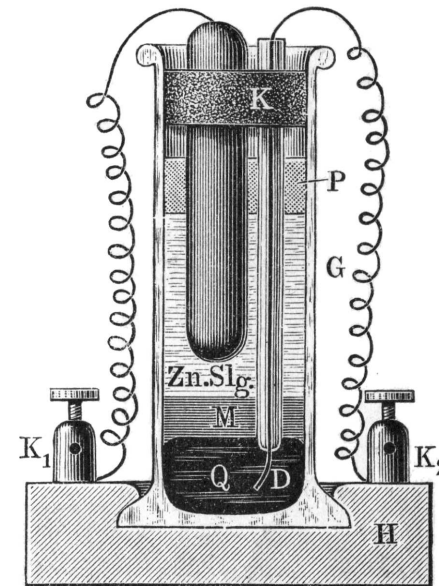


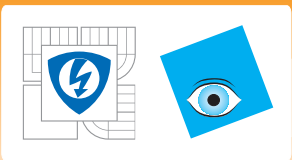
Historie jednotky

Jednotka mezinárodně ustanovena r. 1880.

Definice: rozdíl potenciálů na vodiči, který disipoval jeden watt.

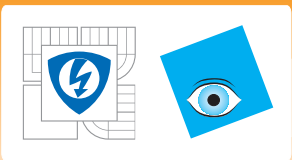
1893 byl definován mezinárodní volt jako $\frac{1}{1.434}$ část napětí Clarkovy chemické baterie.





Historie jednotky

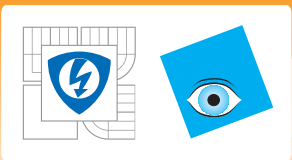
1908 definice změněna a založena na mezinárodním ohmu a ampéru.



Historie jednotky

1908 definice změněna a založena na mezinárodním ohmu a ampéru.

1948 systém reprodukovatelných jednotek opuštěn ve prospěch „absolutních“ jednotek, definice jak známe dnes.

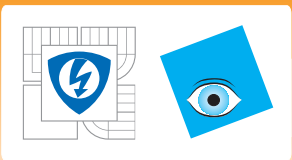


Historie jednotky

1908 definice změněna a založena na mezinárodním ohmu a ampéru.

1948 systém reprodukovatelných jednotek opuštěn ve prospěch „absolutních“ jednotek, definice jak známe dnes.

Jako etalony používány Westonovy baterie a později Zenerovy reference až do objevu Josephsonova jevu.



Dnešní kvantový etalon napětí

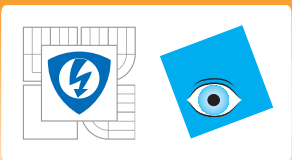
Etalon je založen na **Josephsonově jevu**.

Samotný etalon se skládá z velkého počtu přístrojů a částí.

Je to zdroj napětí **od -10 V do 10 V** s velmi nízkou nejistotou.

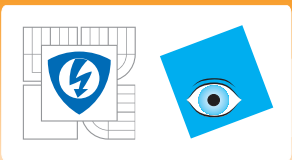
Jev byl popsán Brianem Josephsonem v roce **1962**.





Historie Josephsonova jevu

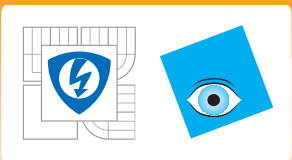
Poprvé pozorován I. Giaeverem roku 1960, ale špatně interpretován jako 'kovový zkrat'.



Historie Josephsonova jevu

Poprvé pozorován I. Giaeverem roku 1960, ale špatně interpretován jako 'kovový zkrat'.

B. D. Josephson předpověděl jev a popsal ho roku 1962.

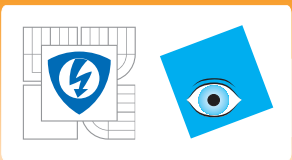


Historie Josephsonova jevu

Poprvé pozorován I. Giaeverem roku 1960, ale špatně interpretován jako 'kovový zkrat'.

B. D. Josephson předpověděl jev a popsal ho roku 1962.

Předpověď byla experimentálně ověřena: Shapiro in 1963.



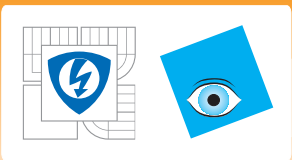
Historie Josephsonova jevu

Poprvé pozorován I. Giaeverem roku 1960, ale špatně interpretován jako 'kovový zkrat'.

B. D. Josephson předpověděl jev a popsal ho roku 1962.

Předpověď byla experimentálně ověřena: Shapiro in 1963.

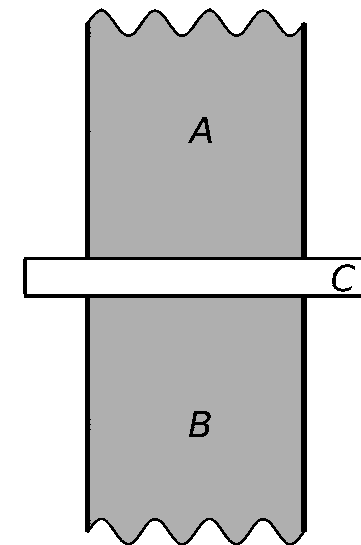
Josephson (1/2), Giaever a Esaki (1/2) získali Nobelovu cenu roku 1973.



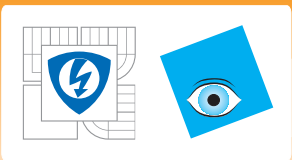
Josephsonův jev

- **ss. Josephsonův jev:**
ss. proud prochází přes Joseph. přechod bez vytvoření napětí na izolátoru

Josephsonův přechod:



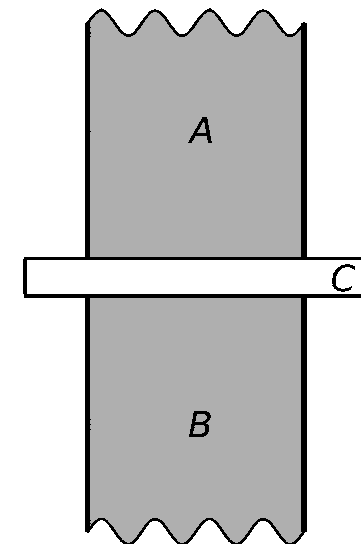
A, B:
supravodiče
C: izolant



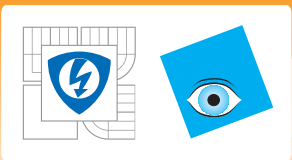
Josephsonův jev

- **ss. Josephsonův jev:**
ss. proud prochází přes Joseph. přechod bez vytvoření napětí na izolátoru
- **stř. Josephsonův jev:**
přivedením ss. napětí na Joseph. přechod se vytvoří proudové oscilace. Převodník napětí na frekvenci.

Josephsonův přechod:



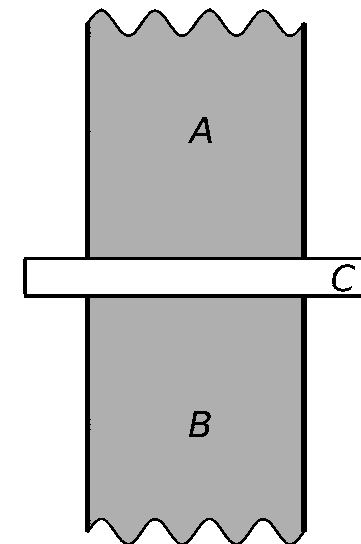
A, B:
supravodiče
C: izolant



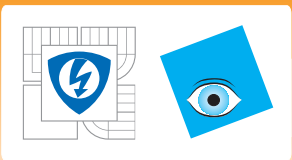
Josephsonův jev

- **ss. Josephsonův jev:**
ss. proud prochází přes Joseph. přechod bez vytvoření napětí na izolátoru
- **stř. Josephsonův jev:**
přivedením ss. napětí na Joseph. přechod se vytvoří proudové oscilace. Převodník napětí na frekvenci.
- **inverzní stř. Josephsonův jev:**
přivedením externího elmag. pole na Joseph. přechod se vytvoří stejnosměrné napětí. Převodník frekvence na napětí.

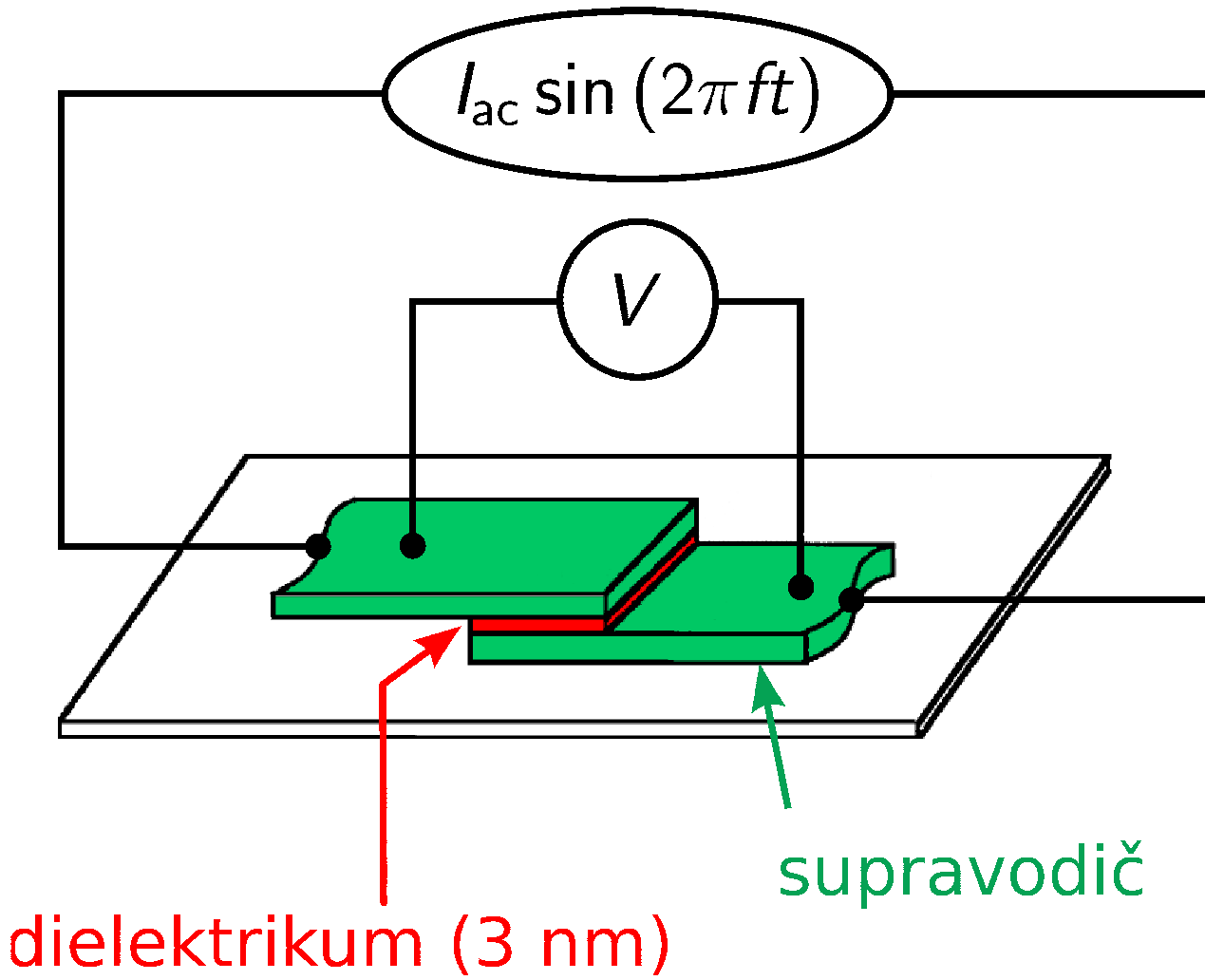
Josephsonův přechod:

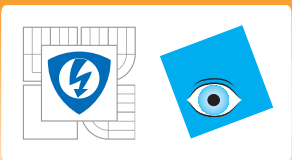


A, B:
supravodiče
C: izolant



Inverzní stř. Josephsonův jev





Josephsonova rovnice

Josephson odvodil následující rovnici pro inverzní stř. Josephsonův jev:

$$V = n \cdot f \cdot \frac{h}{2 \cdot e}$$

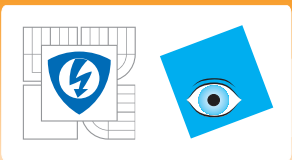
V – napětí vytvořené na Joseph. přechodu.

n – kvantový stav, $n = \pm 1, 2, 3, \dots$

f – frekvence externího elmag. pole.

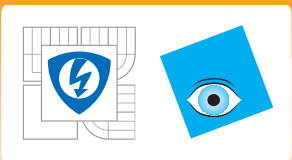
h – Planckova konstanta, $h = 6.62606896(33) \times 10^{-34}$ Js.

e – Elementární náboj, $e = 1.602176487(40) \times 10^{-19}$ C.



Historie Josephsonovy konstanty

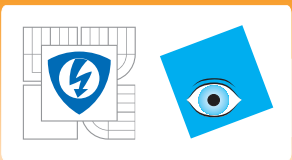
Původně Josephsonův jev sloužil k určení hodnoty $\frac{h}{2 \cdot e}$ (Westonovy baterie sloužily jako etalony napětí). Nejistota byla velká.



Historie Josephsonovy konstanty

Původně Josephsonův jev sloužil k určení hodnoty $\frac{h}{2 \cdot e}$ (Westonovy baterie sloužily jako etalony napětí). Nejistota byla velká.

1970: hodnota Josephsonovy konstanty $K_J = \frac{2 \cdot e}{h}$ byla přijata mnoha metrologickými ústavami a Josephsonův jev jako etalon napětí.



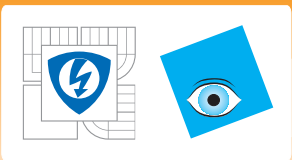
Historie Josephsonovy konstanty

Původně Josephsonův jev sloužil k určení hodnoty $\frac{h}{2 \cdot e}$ (Westonovy baterie sloužily jako etalony napětí). Nejistota byla velká.

1970: hodnota Josephsonovy konstanty $K_J = \frac{2 \cdot e}{h}$ byla přijata mnoha metrologickými ústavami a Josephsonův jev jako etalon napětí.

K_{J-90}

1990: Mezinárodní hodnota K_{J-90} byla přijata celosvětově jako vážený průměr měření provedených do roku 1990.

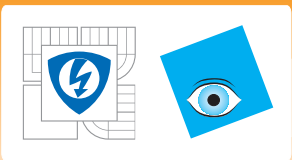


Hodnota a nejistota Josephsonovy konstanty

$$K_{J-90} = 483597,9 \text{ GHzV}^{-1}$$

Nejistota K_{J-90} je 0,4 ppm.

Jelikož nejistota je mnohem větší než typické měření na JVS (porovnání dvou JVS $\ll 0,001$ ppm), není brána v úvahu.



Hodnota a nejistota Josephsonovy konstanty

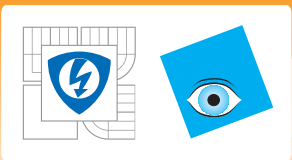
$$K_{J-90} = 483597,9 \text{ GHzV}^{-1}$$

Nejistota K_{J-90} je 0,4 ppm.

Jelikož nejistota je mnohem větší než typické měření na JVS (porovnání dvou JVS $\ll 0,001$ ppm), není brána v úvahu.

Problém bude vyřešen přijetím nové soustavy SI založené na základních fyzikálních konstantách.

Nejistota K_{J-90} bude **nula**.



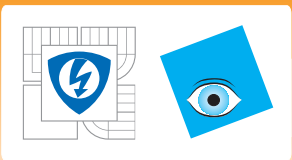
Josephsonův přechod – příklad

Mikrovlny jsou používány pro generování střídavého elmag. pole. Typicky $f = 75$ GHz.

Kvantový stav Josephsonových přechodů je obvykle $n \leq \pm 4$.

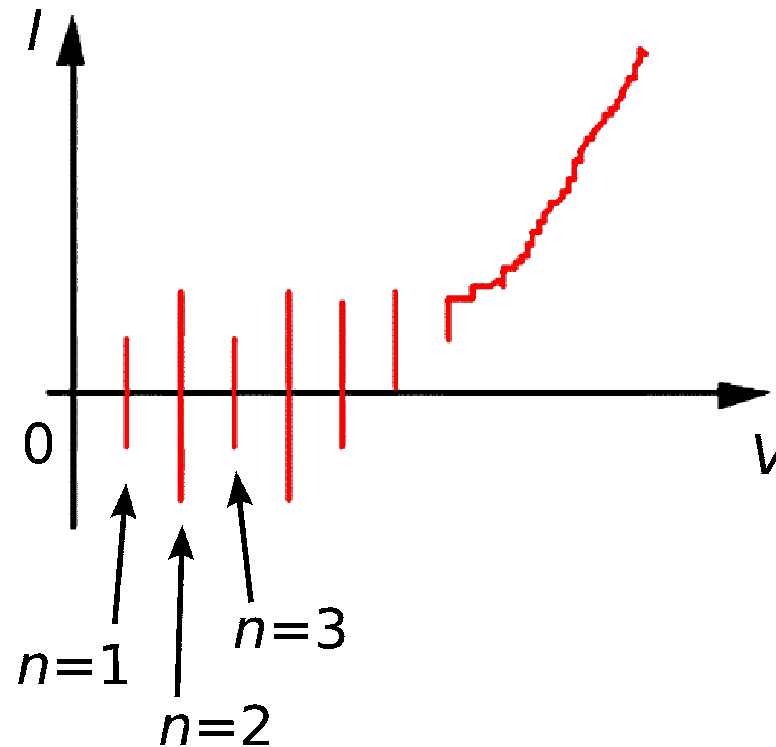
Jeden přechod může generovat napětí:

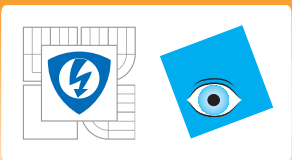
$n = -4$	$V = -620.350 \mu\text{V}$
\vdots	
$n = -1$	$V = -155.088 \mu\text{V}$
$n = 0$	$V = 0 \mu\text{V}$
$n = +1$	$V = +155.088 \mu\text{V}$
\vdots	
$n = +4$	$V = +620.350 \mu\text{V}$



VA charakteristika – přechod s vysokou kapacitou

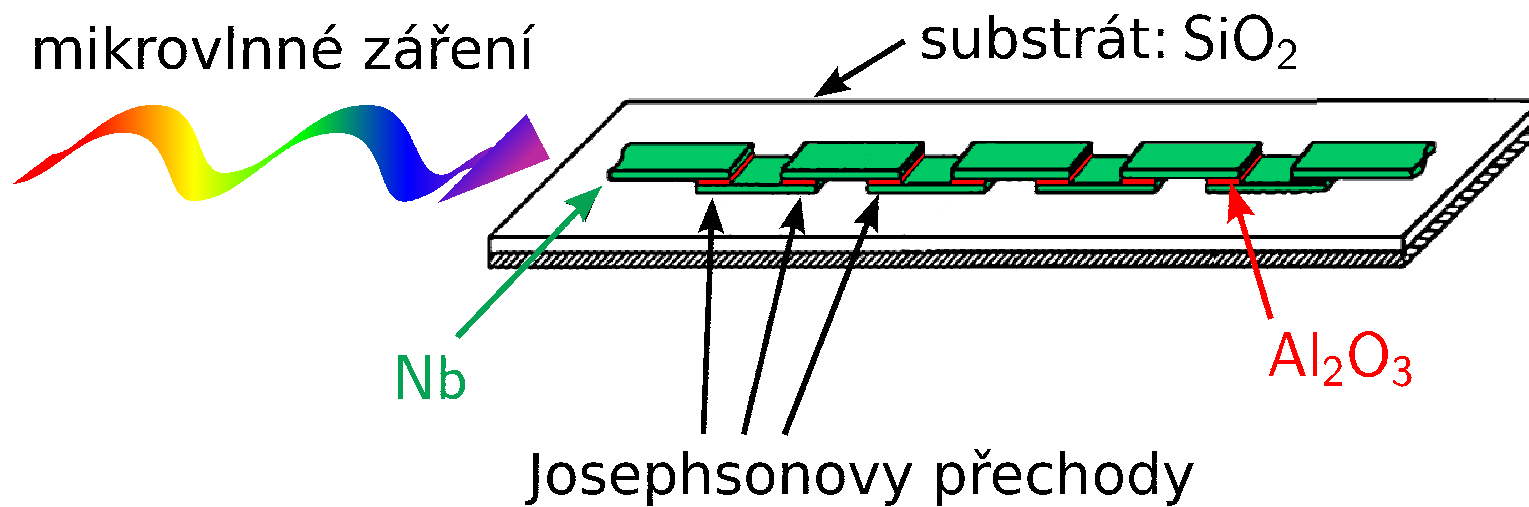
Stabilní stavy procházející nulovým proudem – použito ve všech ss. JVS.





Josephsonovy přechody zapojeny do série

K získání větších napětí:



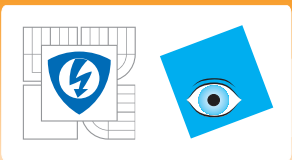
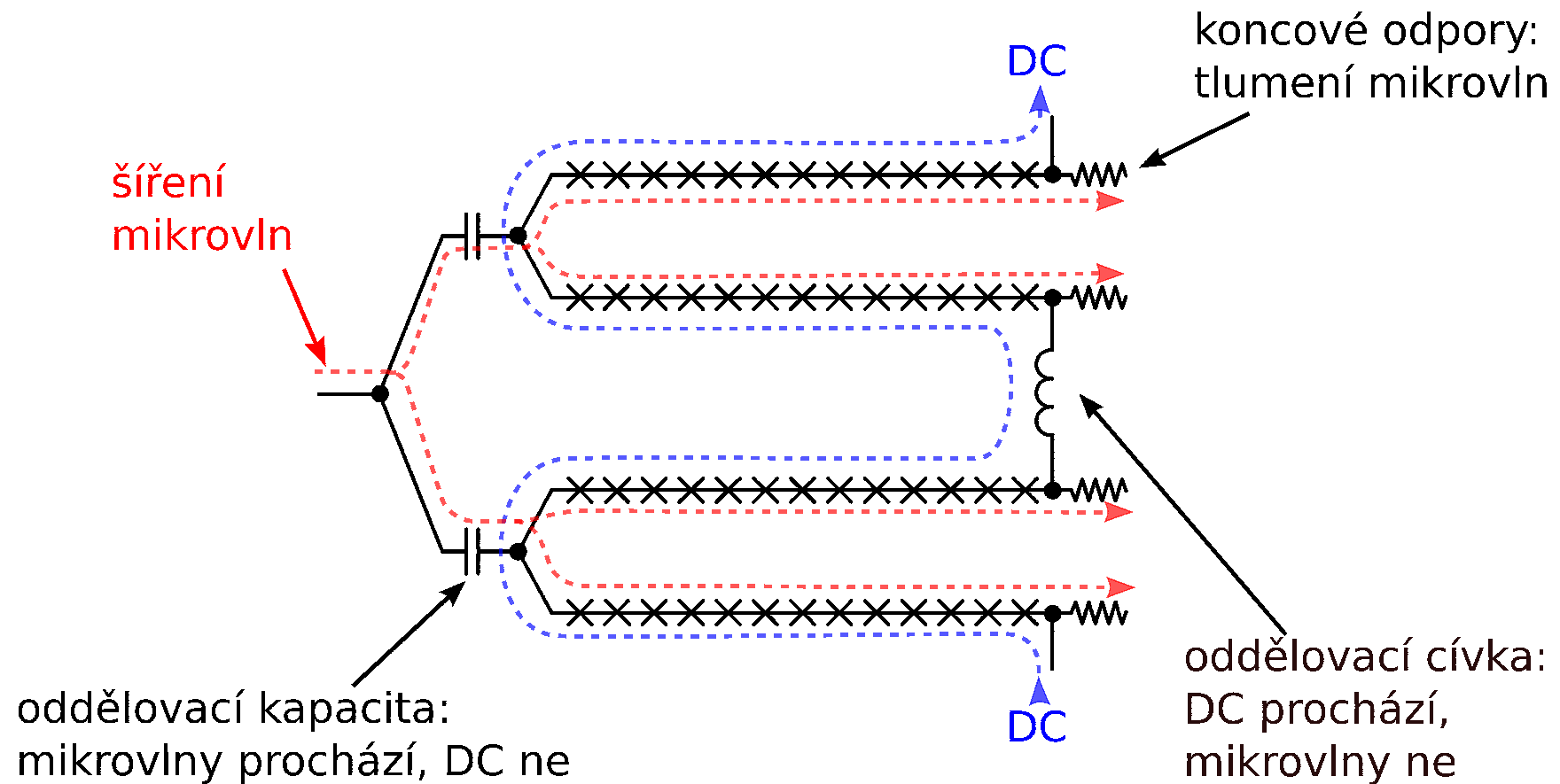
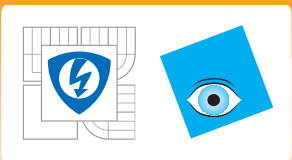


Schéma 10 V čipu

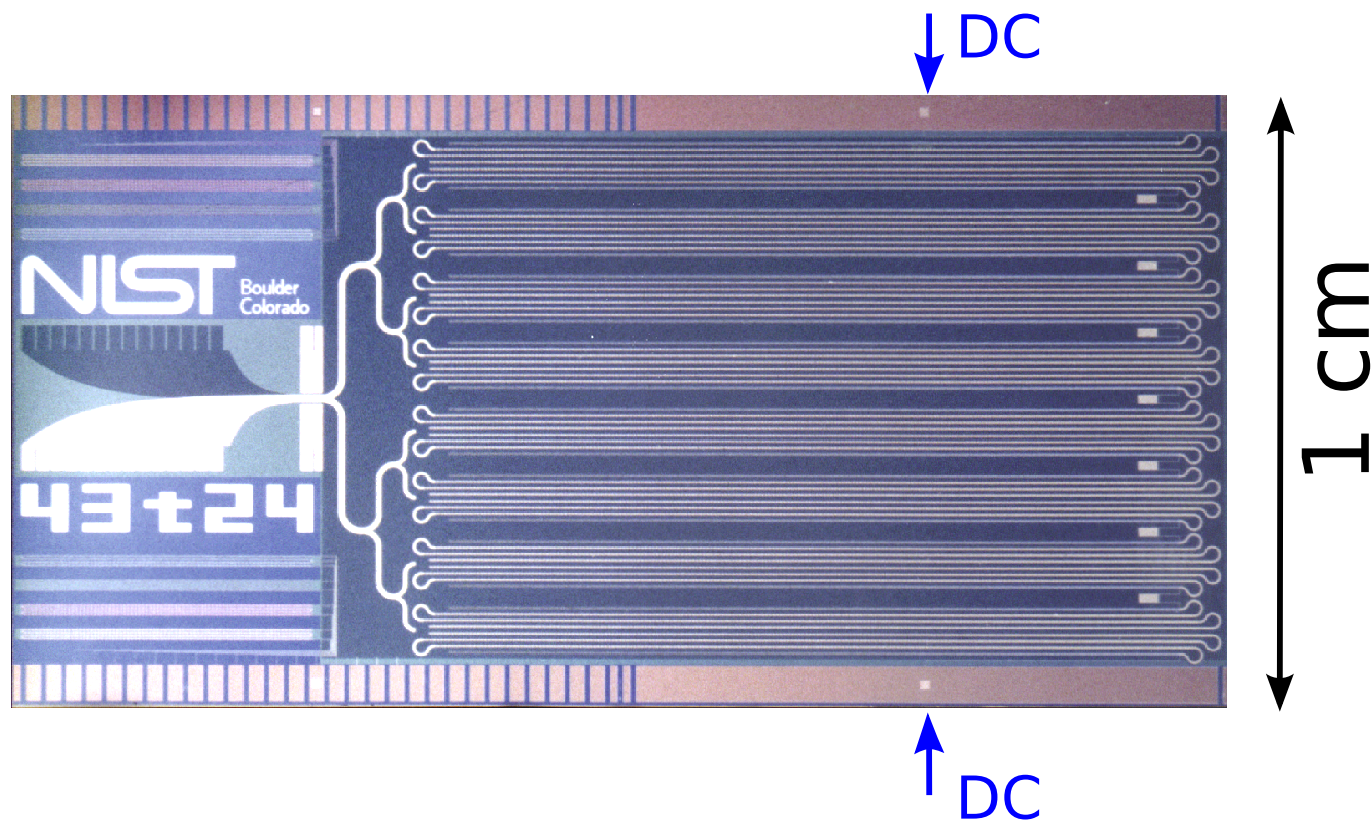
Mikrovlny se musí šířit rovnoměrně všemi J. přechody:

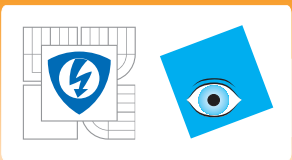




Snímek 10 V čipu

přívod
mikrovln





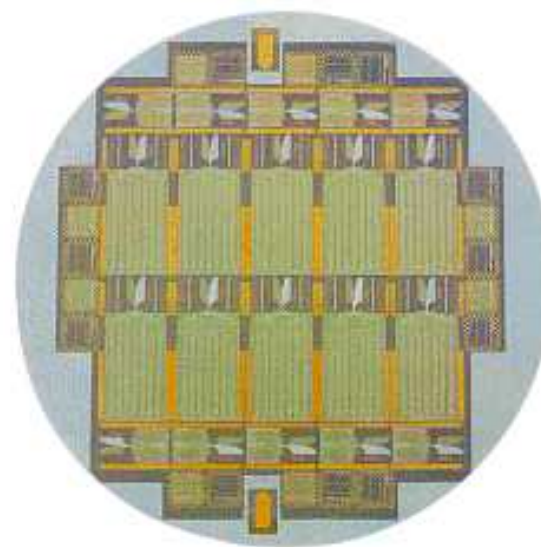
Josephsonovy čipy

10 V čipy mají kolem 20 000 J. přechodů.

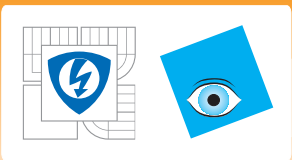
Jen několik laboratoří dokáže vyrobit čipy:

- Hypres (NIST technology), USA
- Supracon a PTB, Germany
- NMIJ, Japan.

Výtěžnost výroby je malá, tedy cena velká.



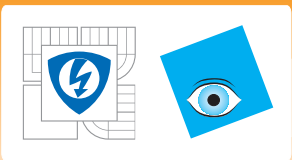
Křemíkový wafer s čipy (Hypres, USA)



Josephson Voltage System (JVS)

JVS je složen z:

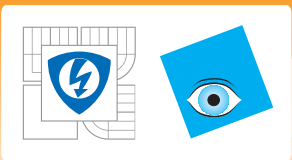
- čip s Josephsonovými přechody



Josephson Voltage System (JVS)

JVS je složen z:

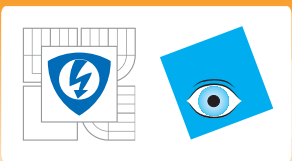
- čip s Josephsonovými přechody
- chlazení k dosažení teploty 4 K



Josephson Voltage System (JVS)

JVS je složen z:

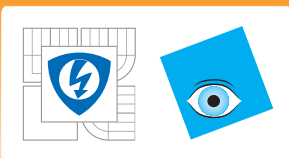
- čip s Josephsonovými přechody
- chlazení k dosáhnutí teploty 4 K
- zdroj mikrovln



Josephson Voltage System (JVS)

JVS je složen z:

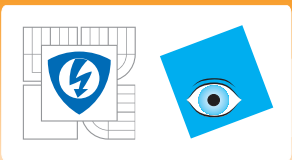
- čip s Josephsonovými přechody
- chlazení k dosažení teploty 4 K
- zdroj mikrovln
- referenční etalon času



Josephson Voltage System (JVS)

JVS je složen z:

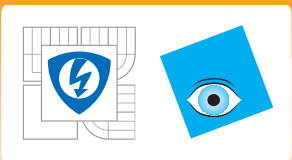
- čip s Josephsonovými přechody
- chlazení k dosažení teploty 4 K
- zdroj mikrovln
- referenční etalon času
- řídicí zdroj



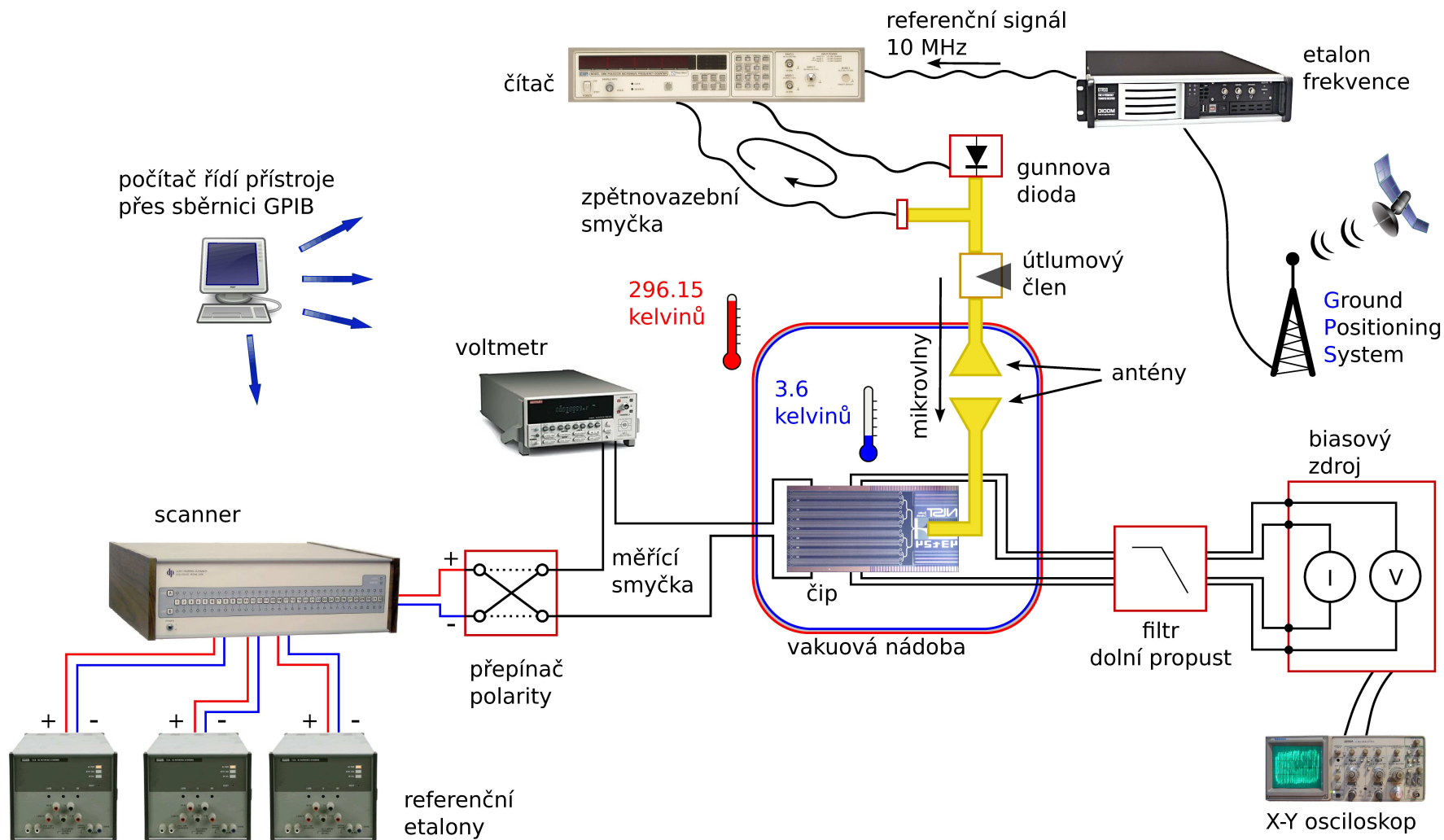
Josephson Voltage System (JVS)

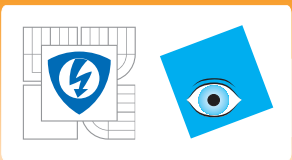
JVS je složen z:

- čip s Josephsonovými přechody
- chlazení k dosažení teploty 4 K
- zdroj mikrovln
- referenční etalon času
- řídicí zdroj
- analogový osciloskop

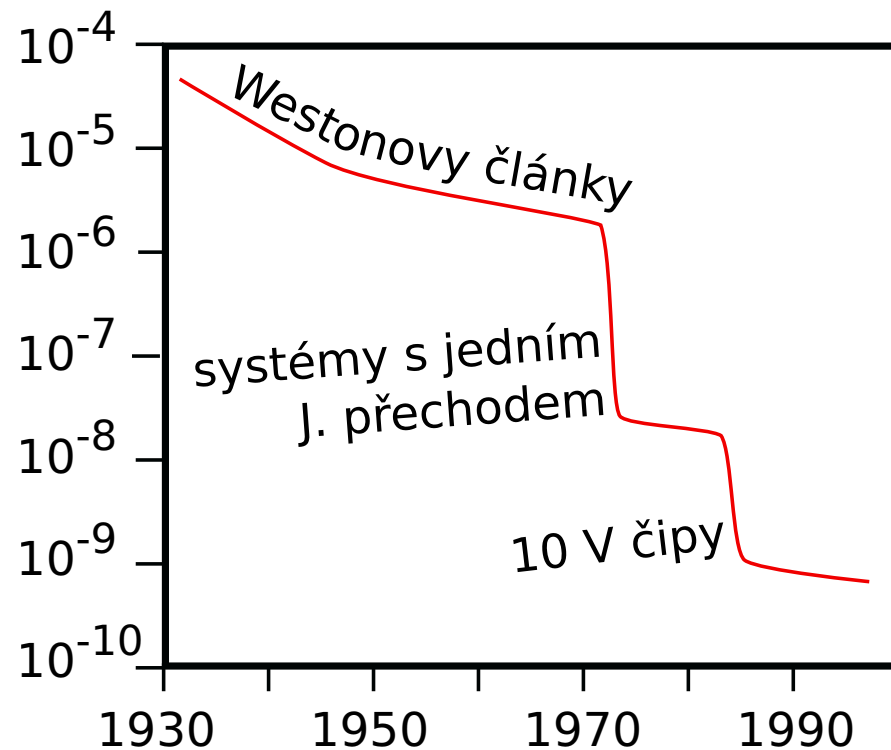


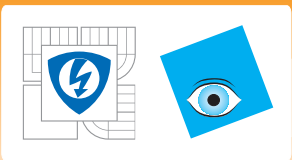
JVS – schéma





Shoda mezi národními metrologickými instituty



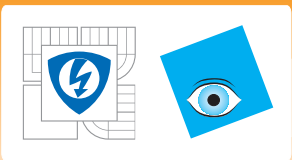


Střídavý JVS

Ve vývoji dva druhy:

- **programovatelný JVS**

J. přechody spínané jednotlivě
ve vývoji od 90-tých let
vyžaduje rychlou elektroniku
vhodné do frekvencí 50 Hz, napětí do 10 V
již používán



Střídavý JVS

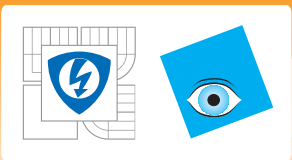
Ve vývoji dva druhy:

- **programovatelný JVS**

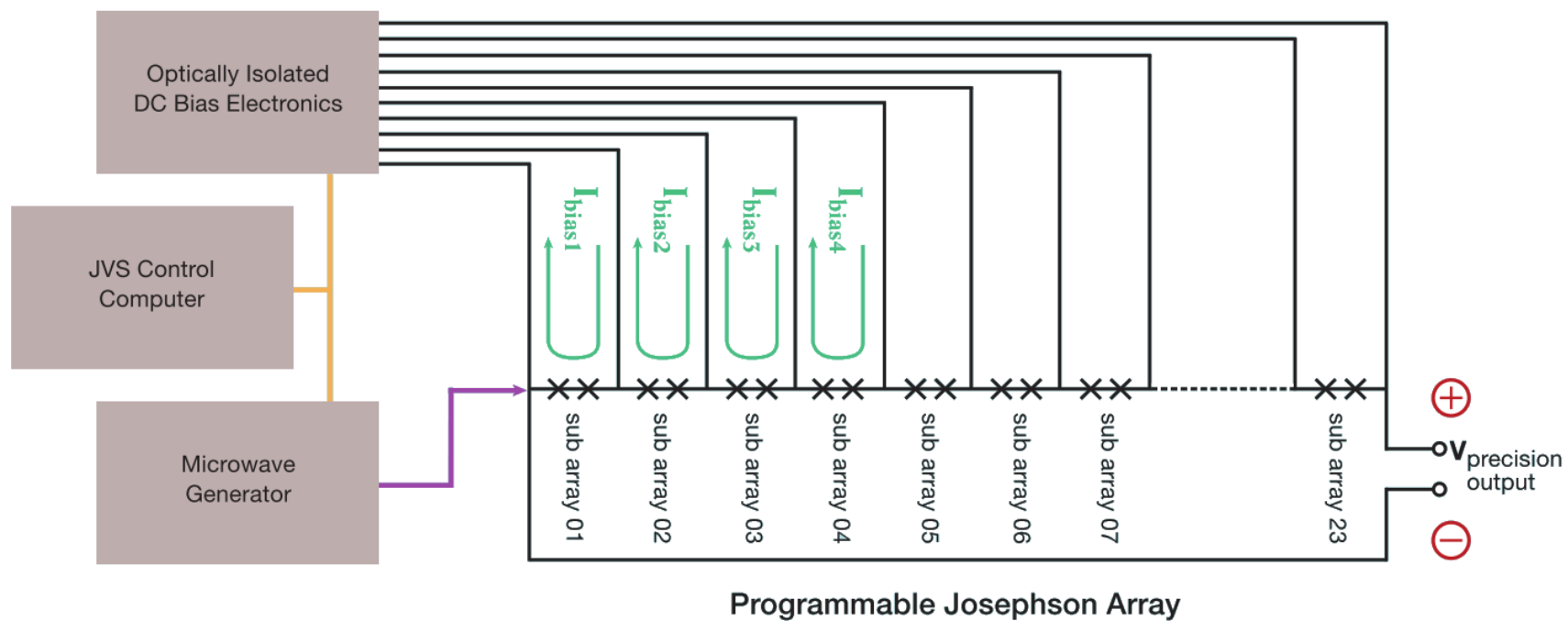
J. přechody spínané jednotlivě
ve vývoji od 90-tých let
vyžaduje rychlou elektroniku
vhodné do frekvencí 50 Hz, napětí do 10 V
již používán

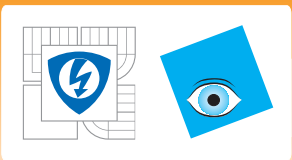
- **pulsní JVS**

J. přechody excitovány pulsy záření
frekvence od ~ 1 kHz do ~ 1 MHz
maximální dosažené napětí 0,3 V
možnost generovat více harmonických frekvencí zároveň



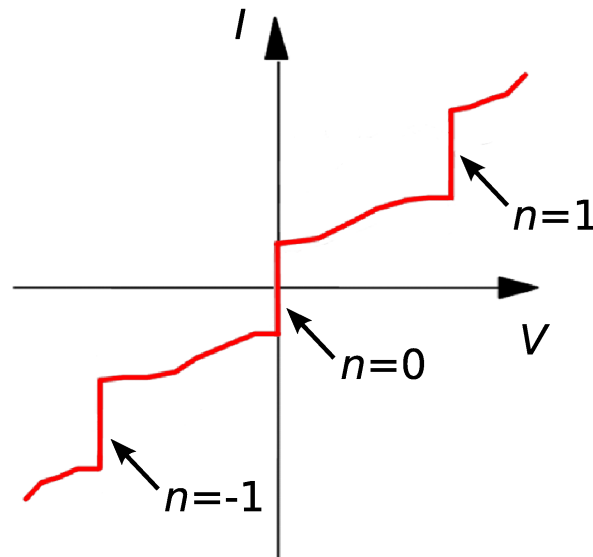
Programovatelný JVS

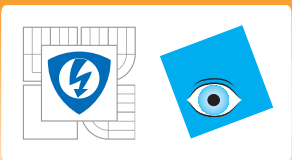




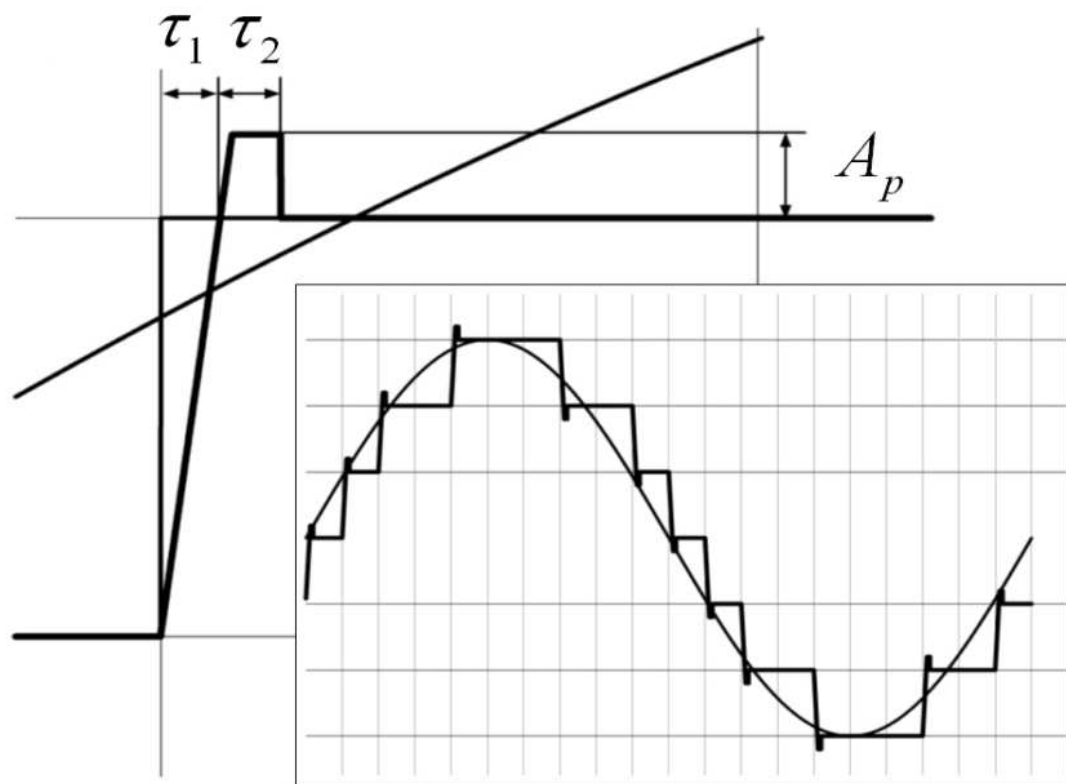
VA charakteristika – přechod s nízkou kapacitou

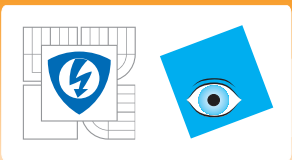
Stabilní stavy o nenulovém proudu – rychlá změna kvantového stavu: vhodné pro programovatelné JVS.



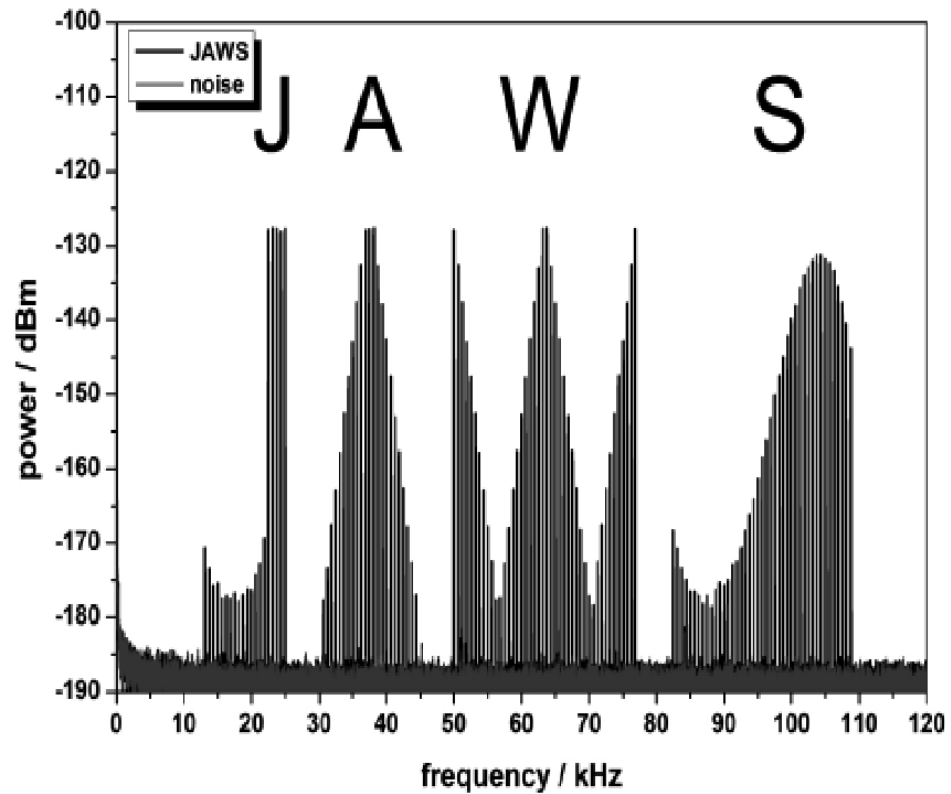


Detail změny kvantového stavu

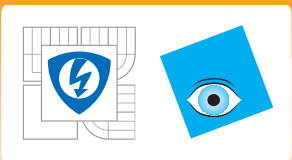




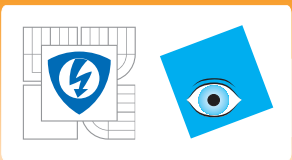
Pulzní JVS



Frekvenční spektrum pulzního JVS (JAWS)
128 Joseph. přechodů.

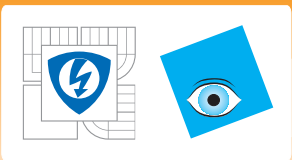


veličina: odpor
jednotka: ohm (Ω)



Historie jednotky Ohm

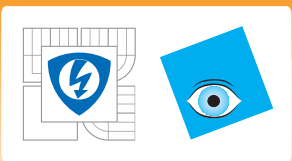
Elektrický odpor byl objeven Georgem Ohmem v roce 1827.



Historie jednotky Ohm

Elektrický odpor byl objeven Georgem Ohmem v roce 1827.

Roku 1980, Klaus von Klitzing objevil kvantový Hallův jev.

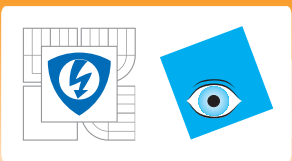


Historie jednotky Ohm

Elektrický odpor byl objeven Georgem Ohmem v roce 1827.

Roku 1980, Klaus von Klitzing objevil kvantový Hallův jev.

Roku 1988 doporučila Mezinárodní komise měr a vah hodnotu von Klitzingovy konstanty.



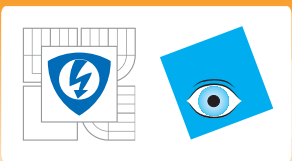
Historie jednotky Ohm

Elektrický odpor byl objeven Georgem Ohmem v roce 1827.

Roku 1980, Klaus von Klitzing objevil kvantový Hallův jev.

Roku 1988 doporučila Mezinárodní komise měř a vah hodnotu von Klitzingovy konstanty.

Po mezinárodní dohodě roku 1990 je hodnota ohmu vztažena ke kvantovému Hallově jevu.



Historie jednotky Ohm

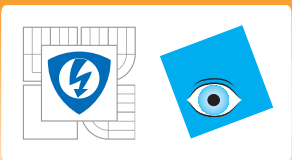
Elektrický odpor byl objeven Georgem Ohmem v roce 1827.

Roku 1980, Klaus von Klitzing objevil kvantový Hallův jev.

Roku 1988 doporučila Mezinárodní komise měř a vah hodnotu von Klitzingovy konstanty.

Po mezinárodní dohodě roku 1990 je hodnota ohmu vztažena ke kvantovému Hallově jevu.

Klaus von Klitzing obdržel Nobelovu cenu v r. 1985.



Hallův jev

Asymetrické rozdělení proudové hustoty za přítomnosti magnetického pole B způsobené Lorentzovou silou.

Hallovo napětí:

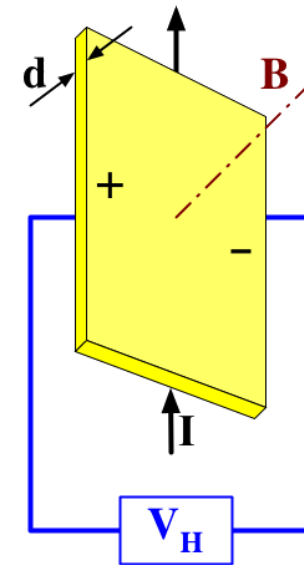
$$V_H = \frac{-IB}{dne}$$

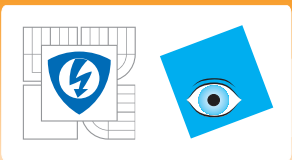
n je hustota nosičů náboje.

Hallův koeficient (odpor):

$$R_H = \frac{E_y}{j_x B} = \frac{dV_H}{IB} = -\frac{1}{ne}$$

j_x je proudová hustota.





Kvantový Hallův jev

Kvantování Hallova napětí a odporu. Hallův odpor nabývá hodnot:

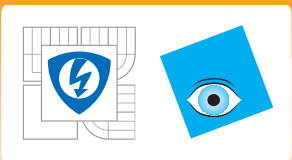
$$R_H = \frac{R_K}{i}$$

i je:

- celé číslo: 1, 2, 3 ...
- nebo zlomek: 1/3, 2/5, 3/7, 2/3, 3/5 ...
nevhodné pro metrologii

R_K je dáno pouze základními konstantami:

$$R_K = \frac{h}{e^2}$$

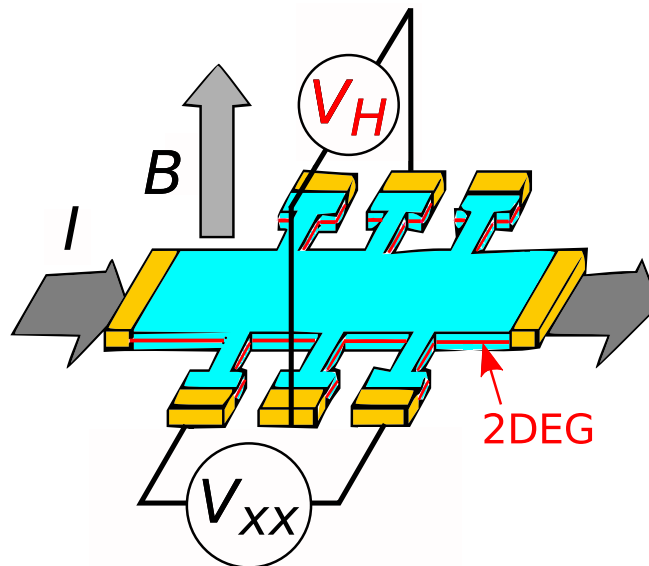


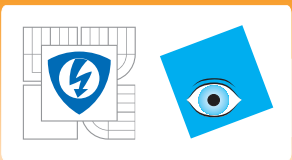
Hall bar

KHJ je pozorován pouze v 2 rozměrných heterostrukturách, tzv. Hall bar. V mřížce se vytvoří 2D elektronový plyn (2DEG).

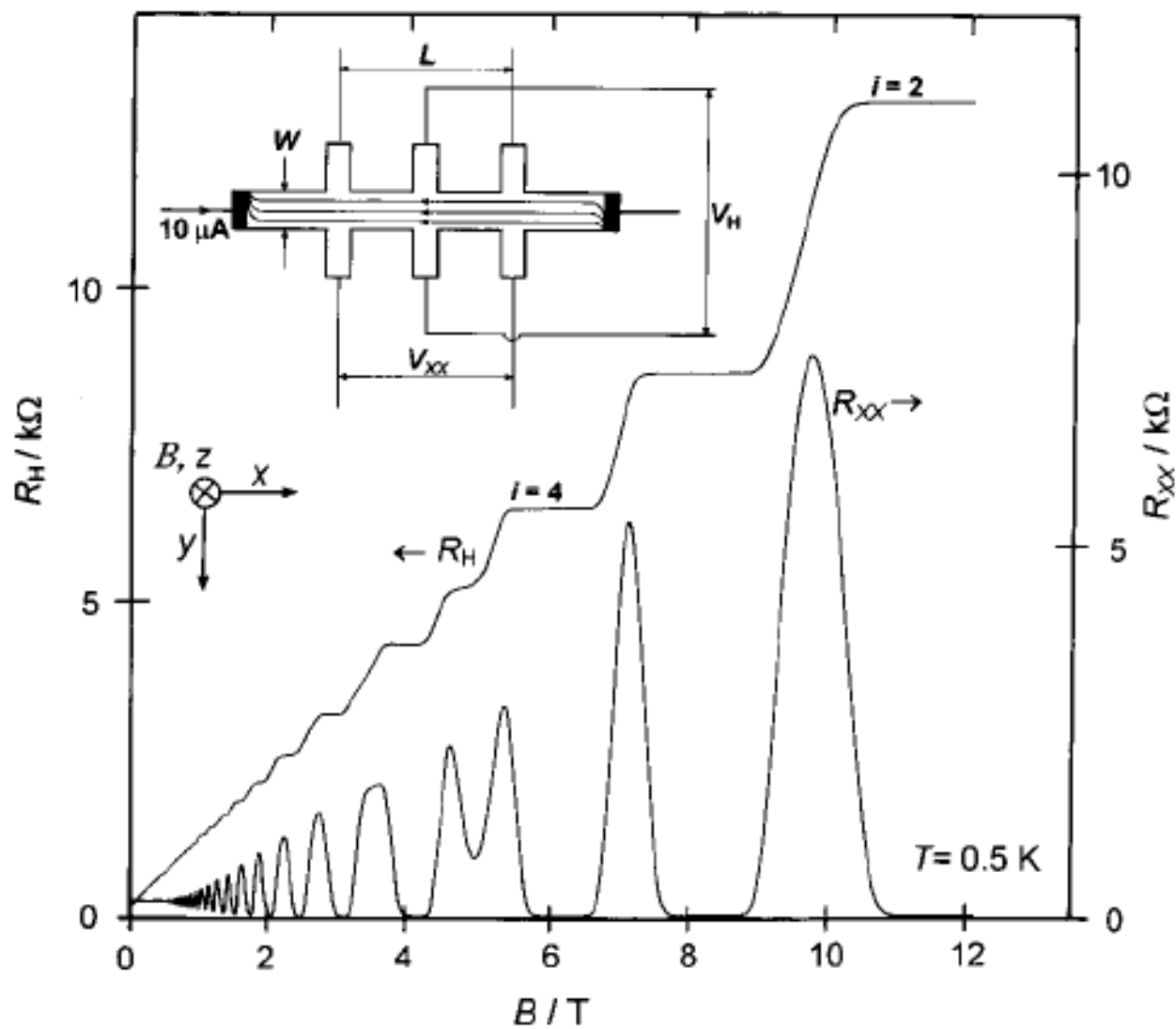
Požadavky:

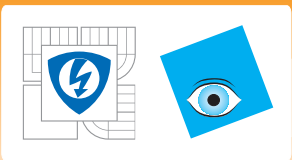
nízká teplota cca. 1,5 K, magnetické pole několik Tesla





Kvantový Hallův jev



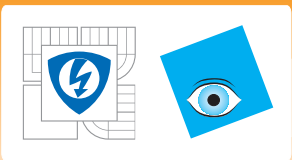


Materiály heterostruktury

Nejčastější materiál:

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$.

Maximální proud je cca. 100 μA .



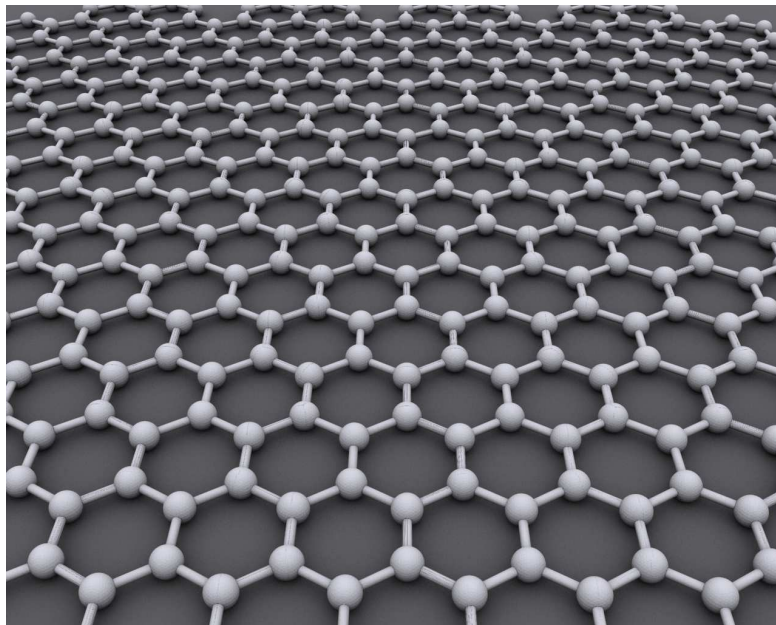
Materiály heterostruktury

Nejčastější materiál:

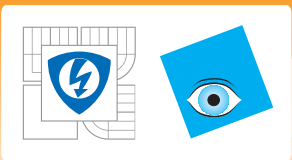
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$.

Maximální proud je cca. **100 μA** .

Objev posledních let: KHE pozorován i v **grafenu**, a to i za pokojových teplot (ale extrémní hodnoty B)



K. S. Novoselov et al.:
Room-Temperature
Quantum Hall Effect in
Graphene, Science, 315,
2007

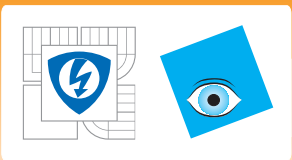


Von Klitzingova konstanta

Vztah $R_K = h/e^2$ stále není všeobecně přijat (narozdíl od Josephsonovy rovnice). Teorie KHJ **není úplná**.

Hodnota von Klitzingovy konstanty je (dle dohody z roku 1990):

$$R_{K-90} = 25812.807 \ \Omega$$



Von Klitzingova konstanta

Vztah $R_K = h/e^2$ stále není všeobecně přijat (narozdíl od Josephsonovy rovnice). Teorie KHJ **není úplná**.

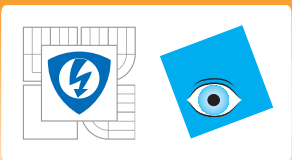
Hodnota von Klitzingovy konstanty je (dle dohody z roku 1990):

$$R_{K-90} = 25812.807 \ \Omega$$

Doplnění teorie KHJ:

A. A. Penin, PhysRevB 79, 2009

Odchylka R_K bude $\sim 10^{-20}$.



KHJ v metrologii

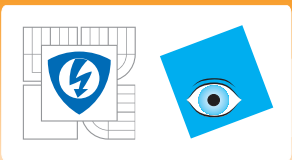
R_{xx} musí být nula, a z praktických důvodů jsou vhodné stavy:

$$i = 2 \text{ or } i = 4,$$

tj. heterostruktura má příčný odpor:

$$12\,906,4035 \, \Omega \text{ or } 6\,453,20175 \, \Omega$$

(reprodukovatelnost cca. 10^{-10}).



KHJ v metrologii

R_{xx} musí být nula, a z praktických důvodů jsou vhodné stavy:

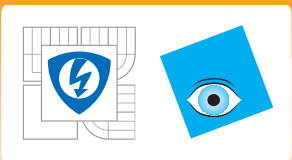
$$i = 2 \text{ or } i = 4,$$

tj. heterostruktura má příčný odpor:

$$12\,906,4035 \, \Omega \text{ or } 6\,453,20175 \, \Omega$$

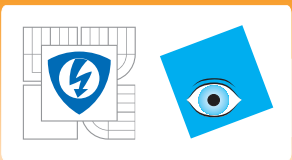
(reprodukovatelnost cca. 10^{-10}).

Využití KHJ pro střídavé proudy je limitováno dielektrickými ztrátami v substrátu heterostruktury. V PTB (Německo) se podařilo překonat speciálním stíněním.



KHJ – foto



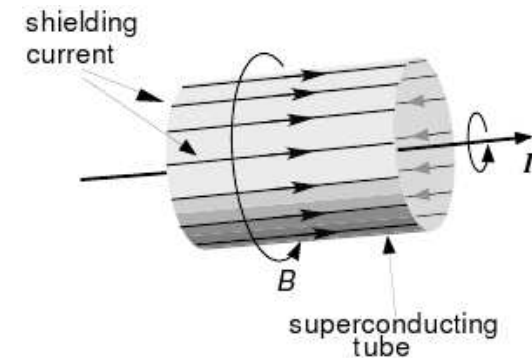


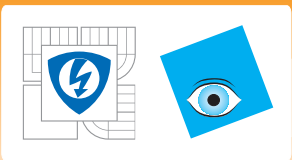
Proudový komparátor

Cryogenic Current Comparator (CCC)

Slouží k porovnání dvou etalonů odporu (nebo přenosu odporu KHJ na artefakt)

Je to most tvořený cívkami, stíněné pomocí **Meissnerova jevu**.



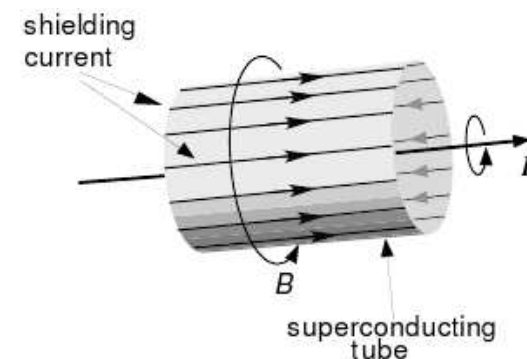


Proudový komparátor

Cryogenic Current Comparator (CCC)

Slouží k porovnání dvou etalonů odporu (nebo přenosu odporu KHJ na artefakt)

Je to most tvořený cívkami, stíněné pomocí **Meissnerova jevu**.



Počet závitů je fixní, zvolený dle KHJ a desítkové řady etalonů odporu. Cívkami tečou proudy opačných polarit.

Porovnání odporů nad **10 k Ω** je limitováno teplotním šumem. Spodní rozsah CCC je cca. **1 Ω** .

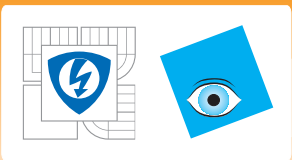
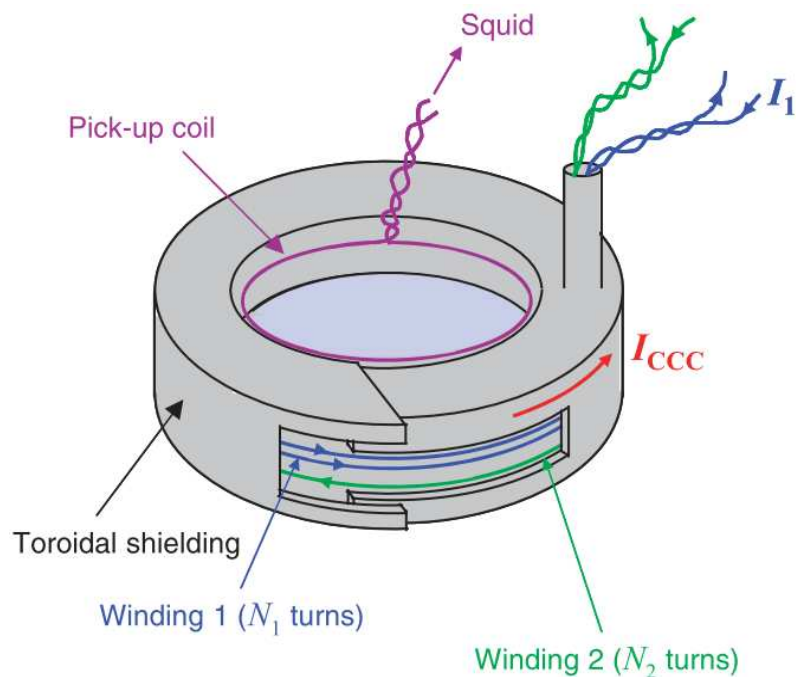
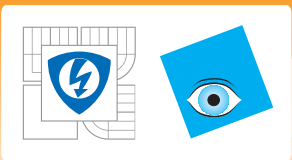


Schéma CCC

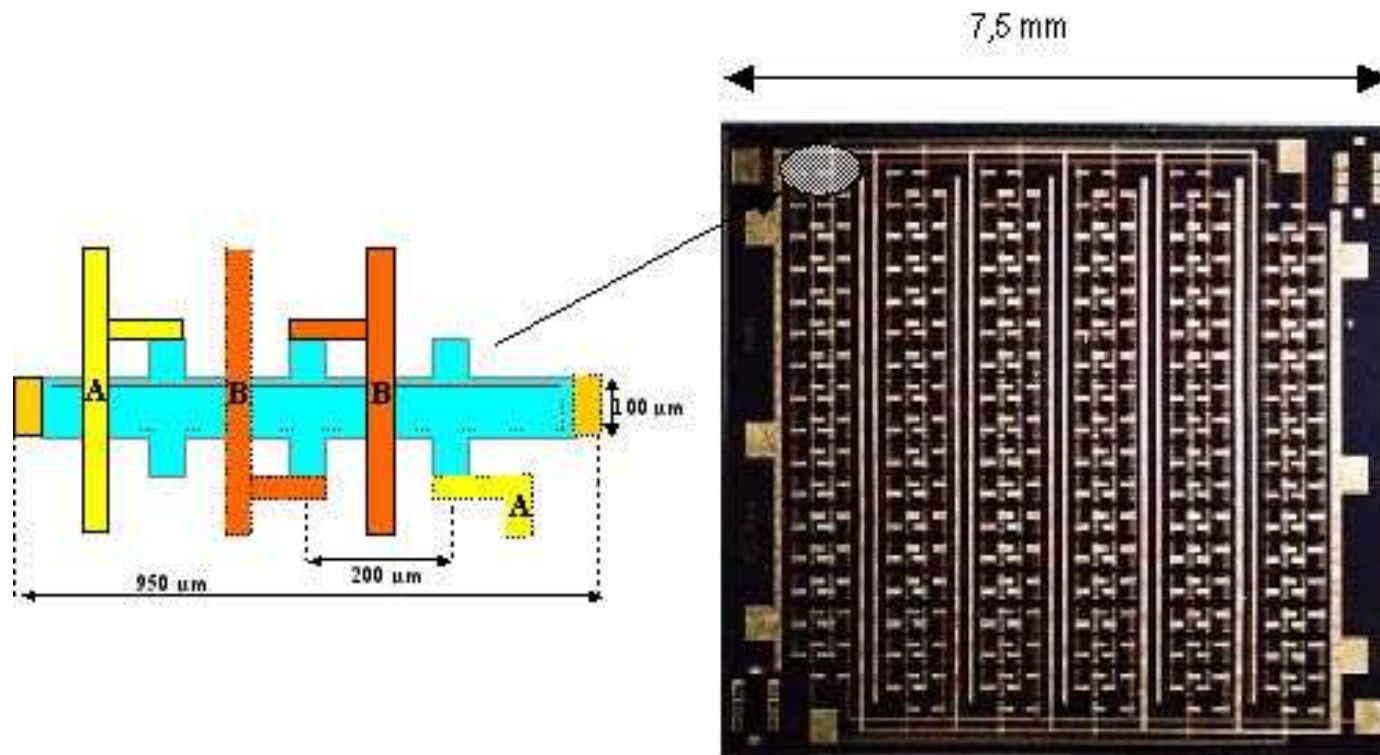


Superconducting Quantum Interference Device (SQUID) je použit jako detektor nulového proudu (součtu proudů oběma cívkami), je tvořen smyčkou s dvěma Josephsonovými přechody.

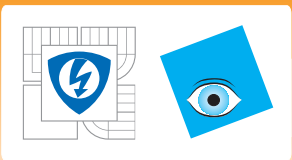


Quantum Hall Arrays – QHARS

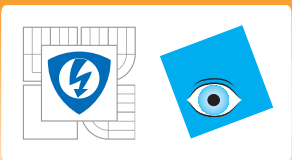
Sériově nebo paralelně zapojené Hall bar.



100 Hall bar na jednom čipu, nominální hodnota $32,266 \Omega$ (LNE, Francie).



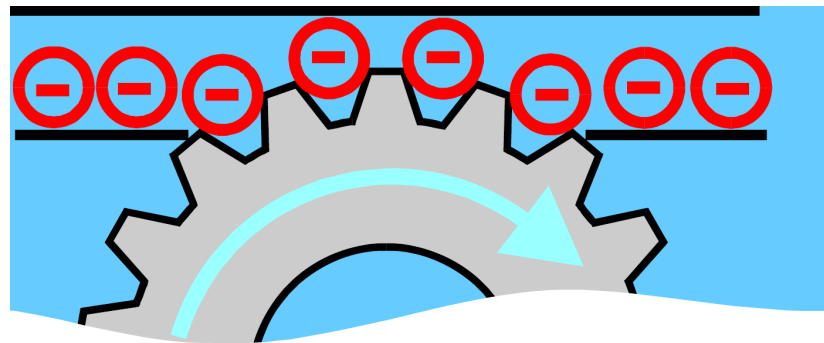
veličina: proud
jednotka: ampér (A)



Kvantový etalon proudu

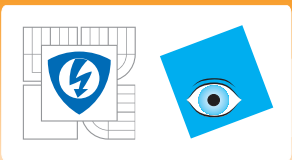
Transport jednotlivých elektronů, a tedy jejich počet za sekundu.

Doslova počítání elektronů jeden po druhém.



$$I = nef$$

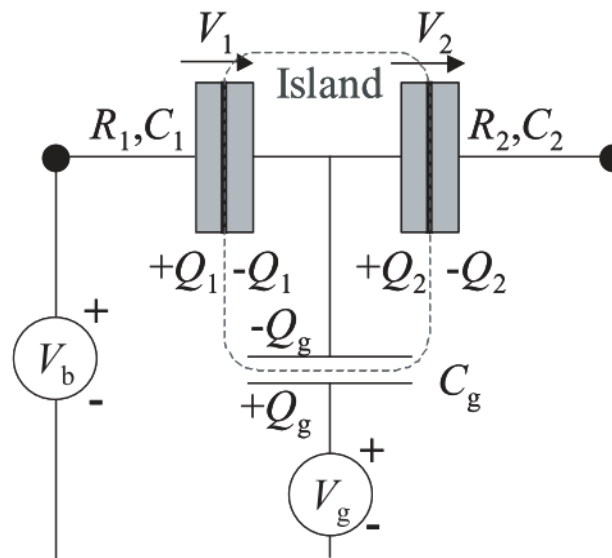
$$f = 5 \text{ MHz} \rightarrow I = 0,8 \text{ pA}$$



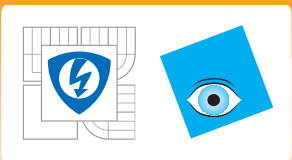
SET tranzistory

Tranzistory SET (Single Electron Tunneling): bariéry široké nanometry, vyráběny od devadesátých let.

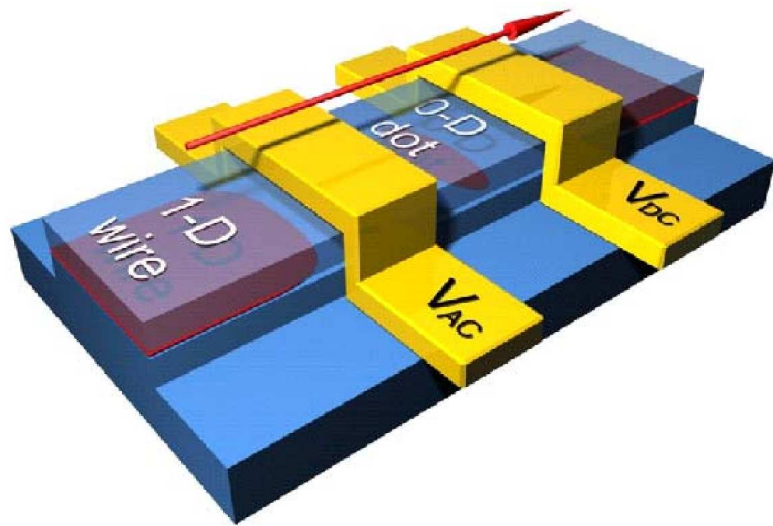
První SET: Fulton & Dolan, 1987, Bell laboratories.



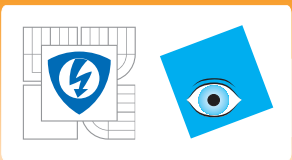
$$k_B T \ll E_C, E_C \simeq e^2 / C \rightarrow T \simeq 20 \text{ mK}$$



Princip SET



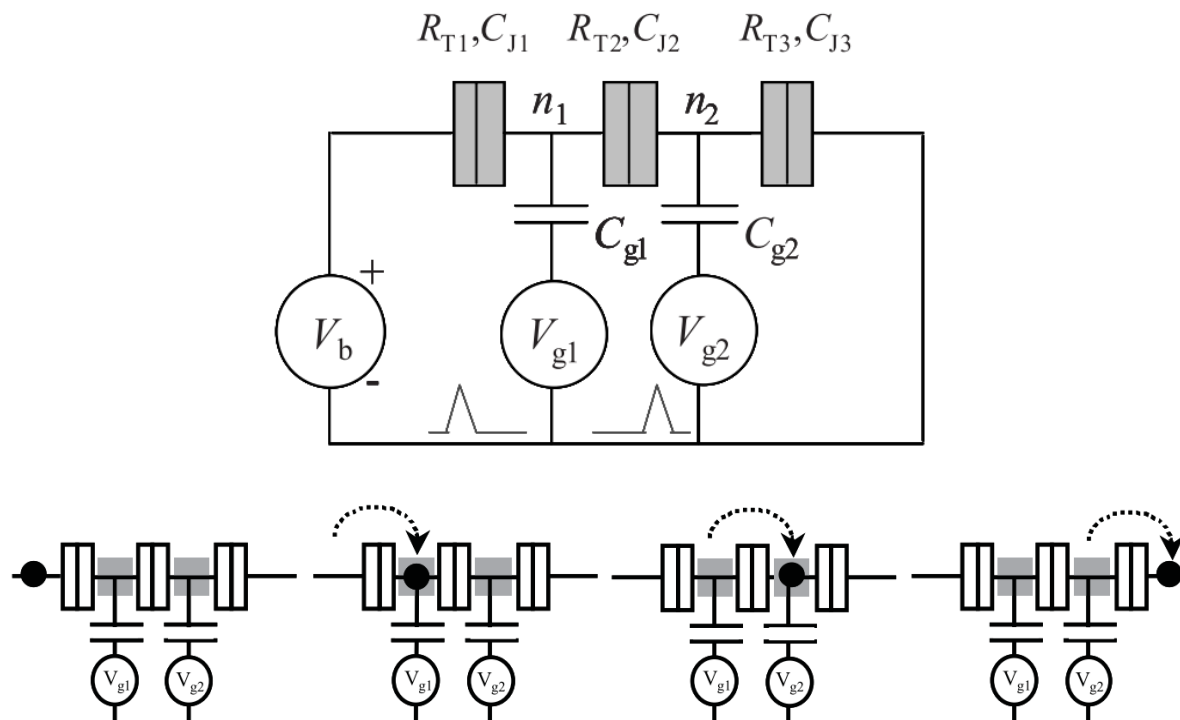
Animace SET

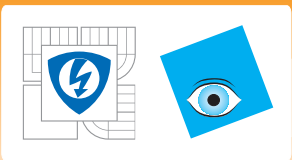


Elektronové pumpy

Elektron je postupně pumpován skrz několik SET tranzistorů, snížení nejistoty proudu.

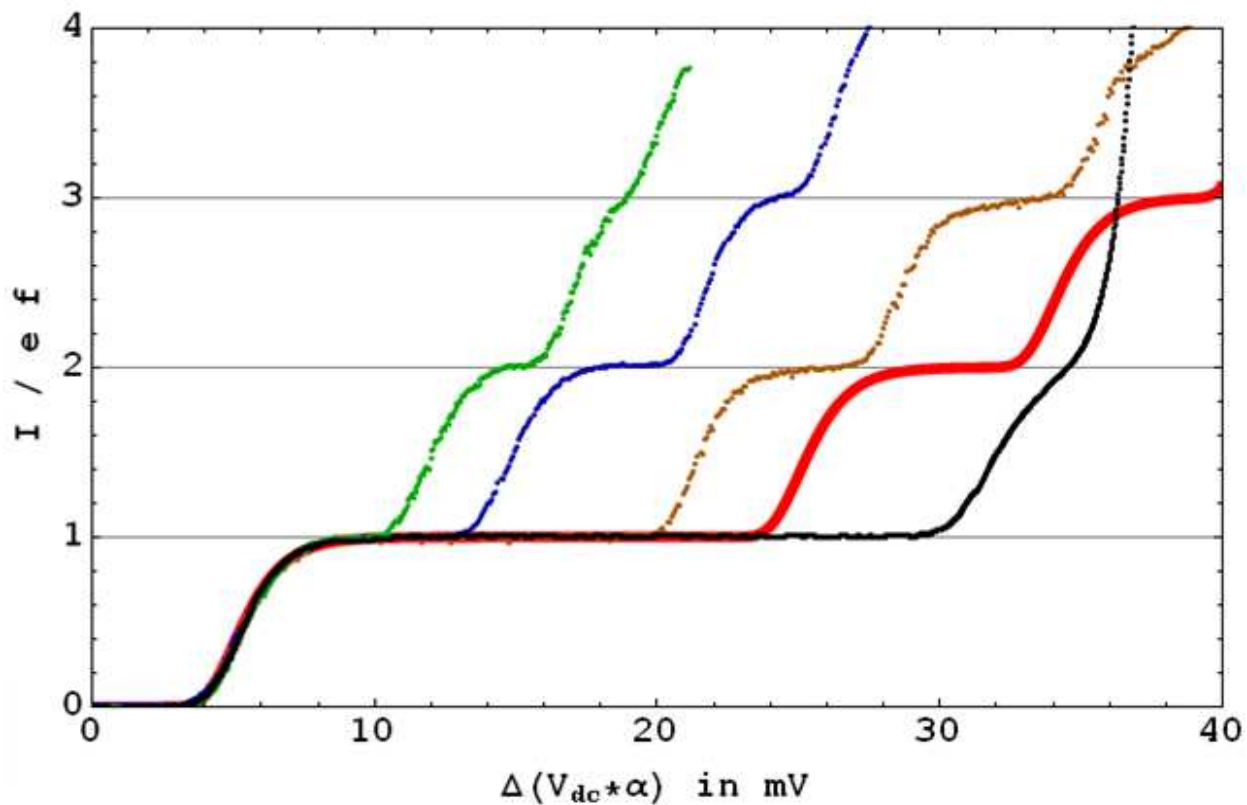
Poprvé sestavena: H. Pothier, et al., Europhys. Lett. 17, 249 (1992)

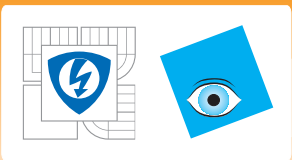




Parametry elektronových pump

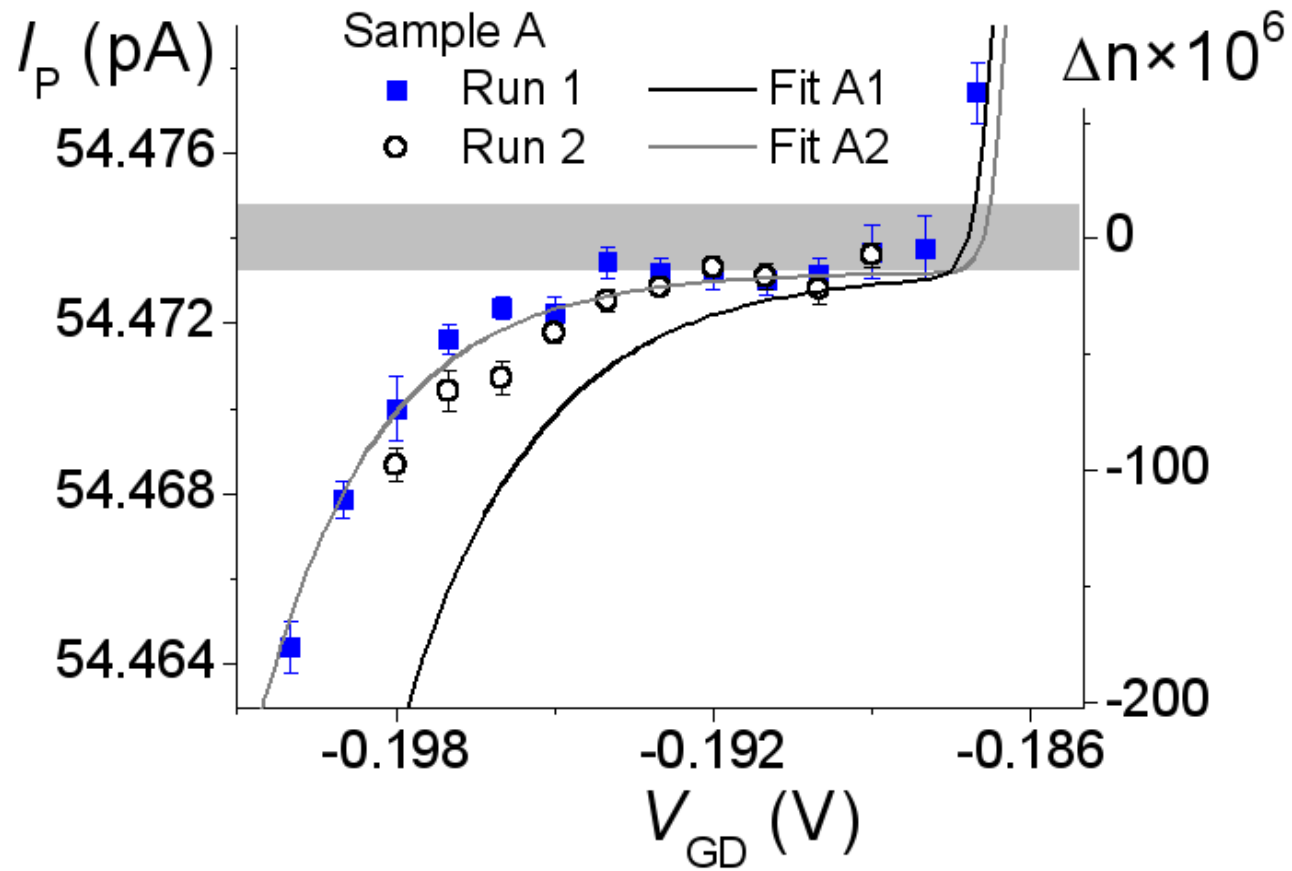
Pumpy můžou pracovat ve více režimech:

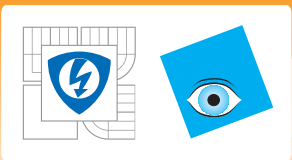




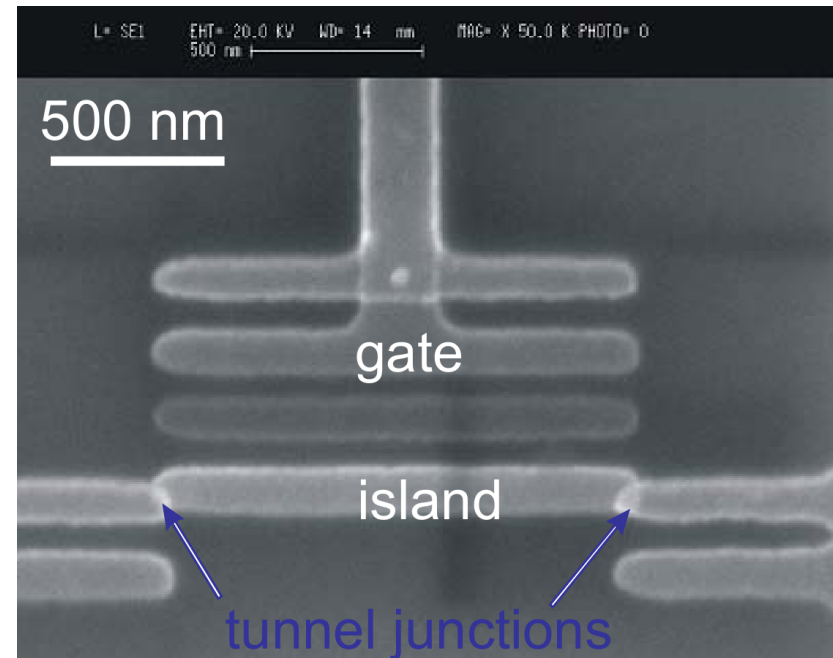
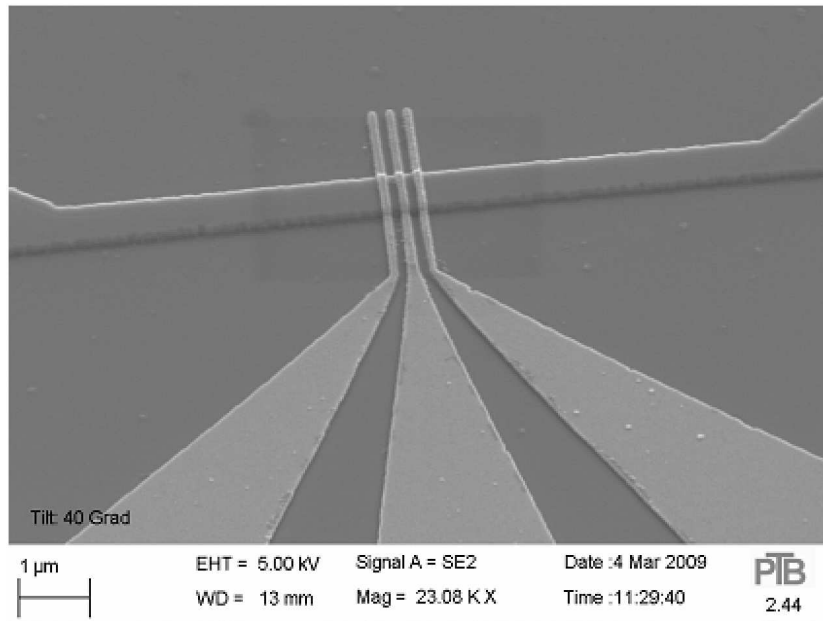
Problém elektronových pump

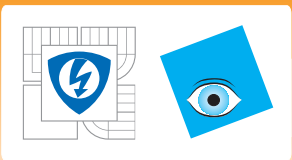
Je těžké určit správný pracovní bod v inflexi křivky.





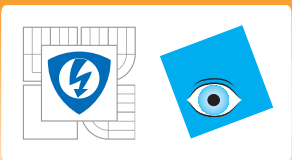
Snímky SET tranzistorů





Metrologický trojúhelník



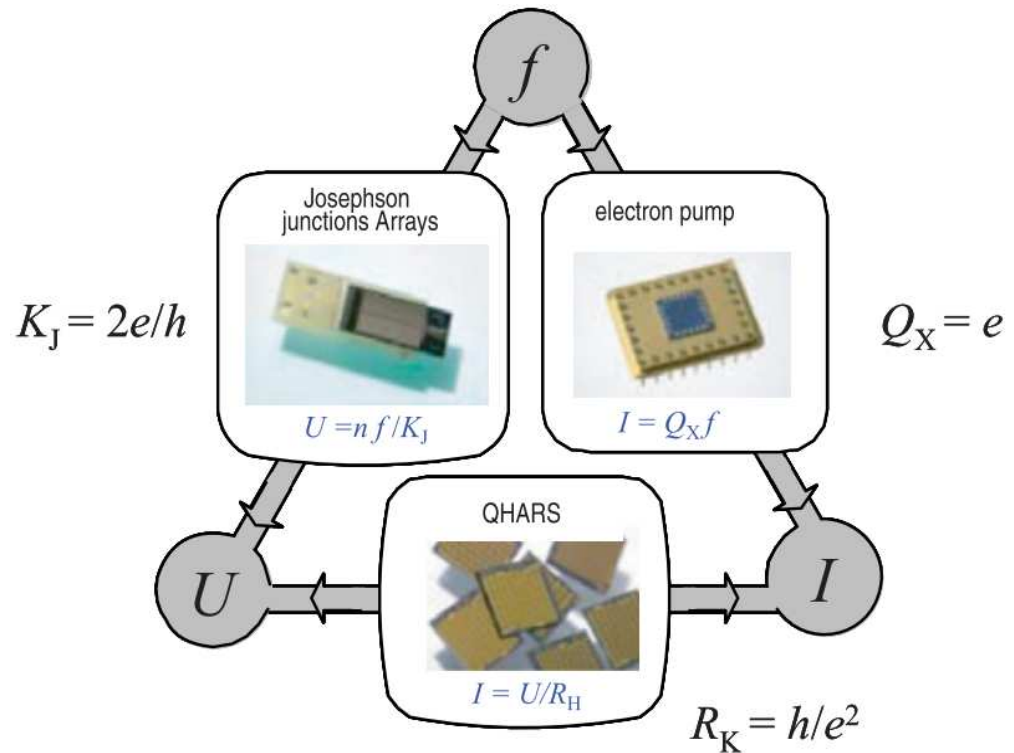


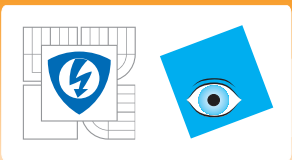
Kvantový metrologický trojúhelník

Svatý grál metrologie elektrických veličin.

$$R_K K_J Q_X = 2$$

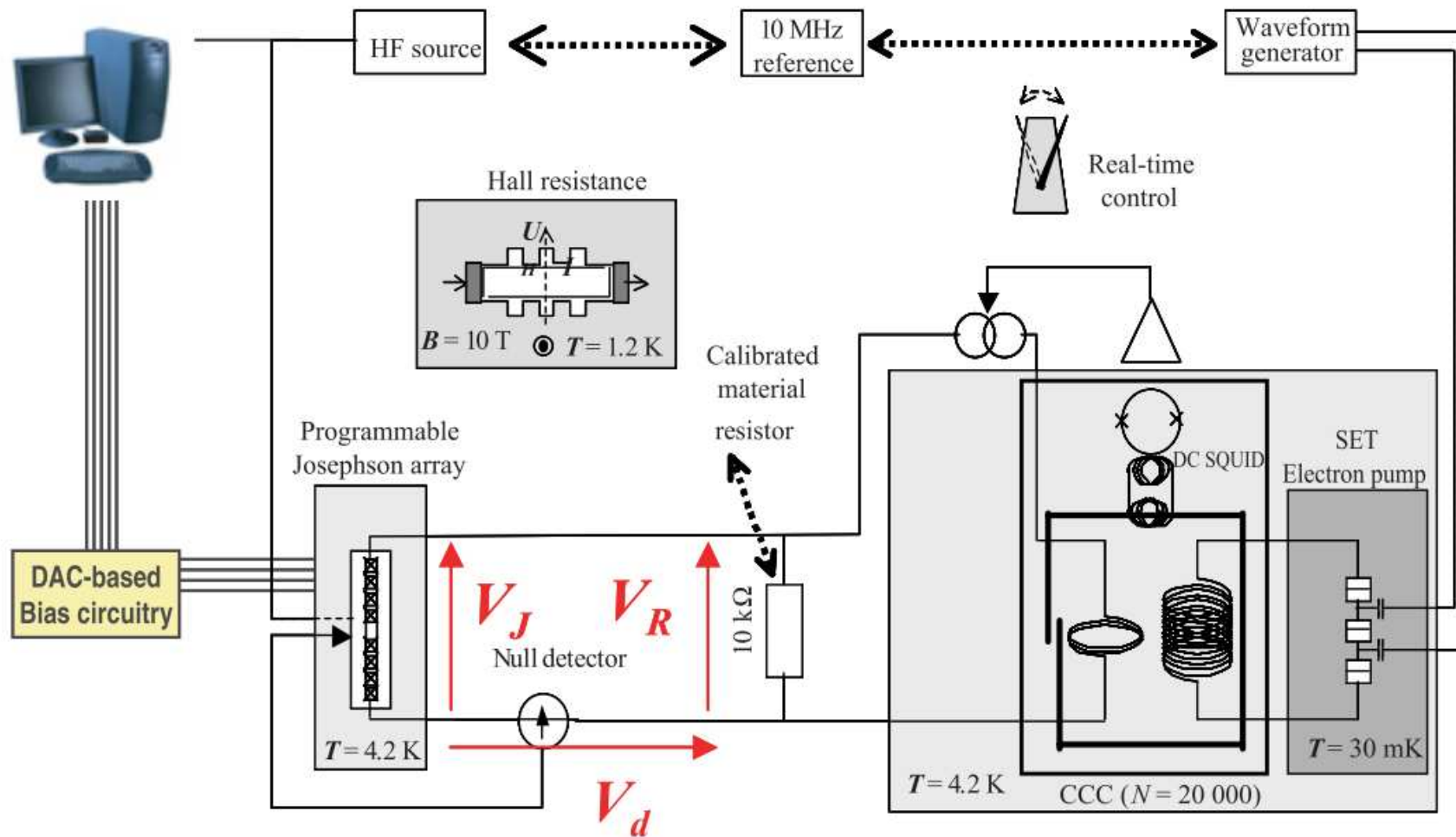
Snaha splnit relaci s nejistotou 10^{-8} .

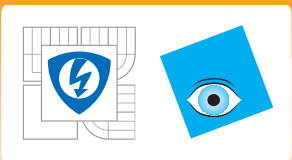




Přímé uzavření trojúhelníku

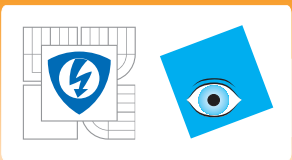
Příklad probíhajícího experimentu v LNE (Francie)





Nepřímé uzavření trojúhelníku

Pomocí SET se nabíjí kondenzátor: $Q = CV$.
Napětí na kondenzátoru se změří vůči JVS.

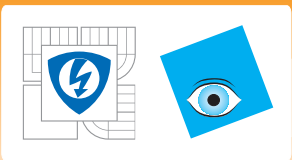


Nepřímé uzavření trojúhelníku

Pomocí SET se nabíjí kondenzátor: $Q = CV$.
Napětí na kondenzátoru se změří vůči JVS.

Hodnota kondenzátoru je určena

1. pomocí kvadraturního mostu vůči etalonu času a KHJ.
2. nebo porovnáním s vypočitatelným kondenzátorem typu Thompson-Lampard



Nepřímé uzavření trojúhelníku

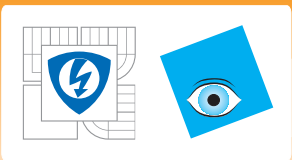
Pomocí SET se nabíjí kondenzátor: $Q = CV$.
Napětí na kondenzátoru se změří vůči JVS.

Hodnota kondenzátoru je určena

1. pomocí kvadrurního mostu vůči etalonu času a KHJ.
2. nebo porovnáním s vypočitatelným kondenzátorem typu Thompson-Lampard

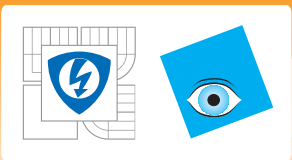
Metoda je velmi obtížná.

NIST realizoval metodu 1 r. 2007 s nejistotou $9,2 \times 10^{-7}$.
PTB realizovalo metodu 2 r. 2011 s nejistotou 3×10^{-6} .

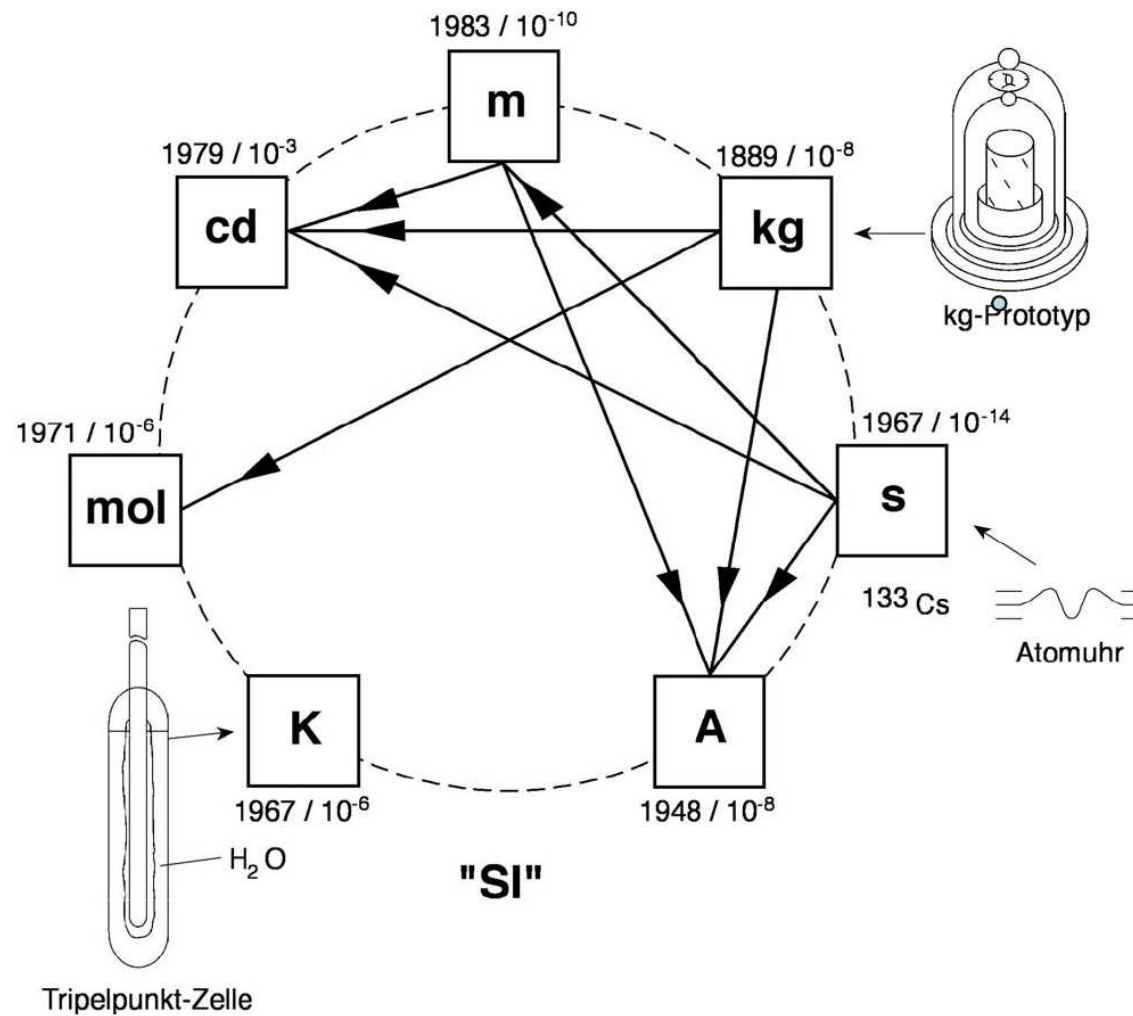


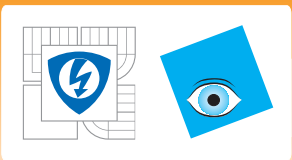
System jednotek

SI



Současný systém SI

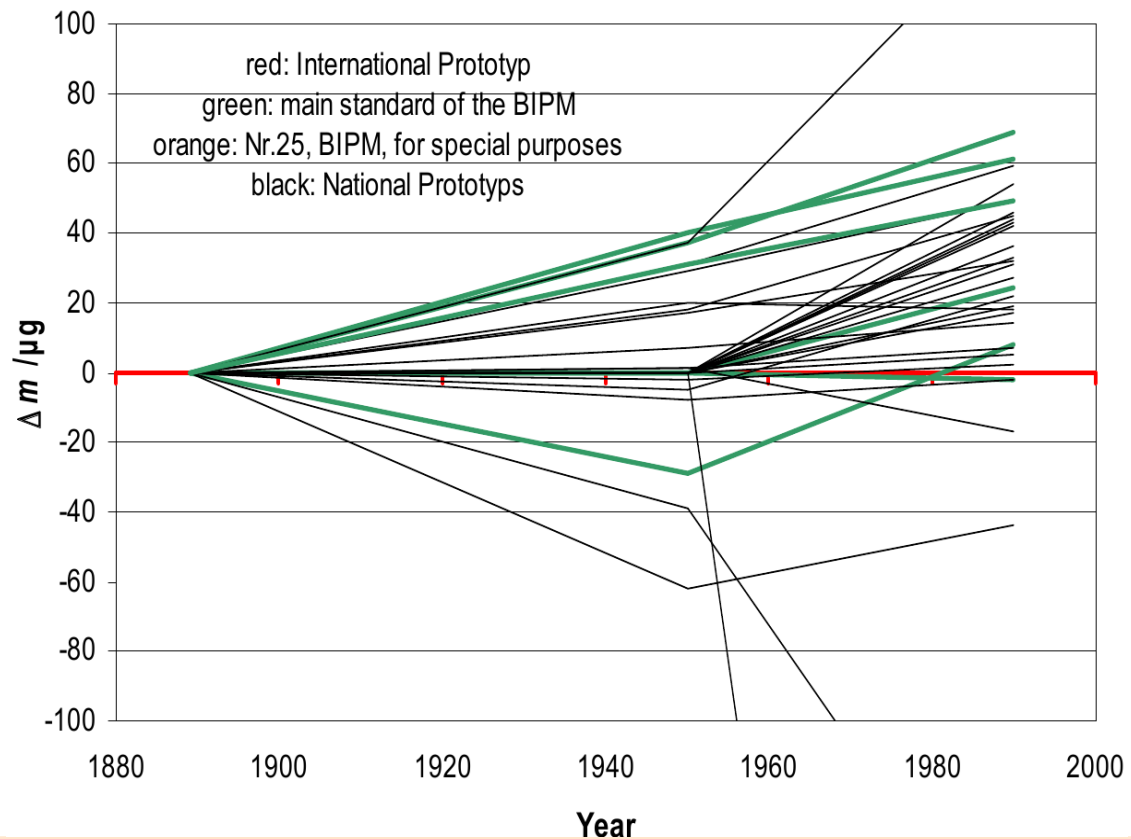


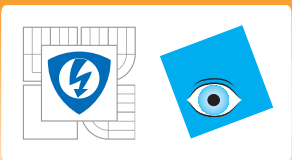


Problém kilogramu

Primární etalon kilogramu je **artefakt**. Jeho hodnota se asi mění.

Mass of Prototypes in 1889, 1950 and 1990

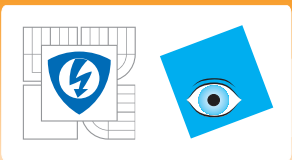




Nový etalon kg

Nové odvození kilogramu od planckovy konstanty:
 $h \equiv 6,62606896 \times 10^{-34} \text{ Js} (u_h = 0)$ (CODATA 2006)

- projekt **Avogadro**: počítání atomů v SI kouli

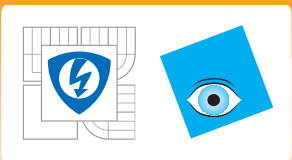


Nový etalon kg

Nové odvození kilogramu od planckovy konstanty:

$$h \equiv 6,62606896 \times 10^{-34} \text{ Js } (u_h = 0) \text{ (CODATA 2006)}$$

- projekt **Avogadro**: počítání atomů v SI kouli
- **Watové váhy**: odvození kg z elektrických měření



Nový etalon kg

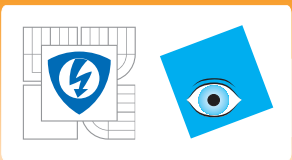
Nové odvození kilogramu od planckovy konstanty:

$$h \equiv 6,62606896 \times 10^{-34} \text{ Js } (u_h = 0) \text{ (CODATA 2006)}$$

- projekt **Avogadro**: počítání atomů v SI kouli
- **Watové váhy**: odvození kg z elektrických měření

Pravděpodobné budoucí definice kg:

- The kilogram is the mass of a body at rest whose equivalent energy corresponds to a frequency of exactly $[(299792458)^2 / 662606896] \times 10^{41} \text{ Hz}$.
- The kilogram is the mass of a body at rest whose de Broglie-Compton frequency is equal to exactly $[(299792458)^2 / (6,62606896 \times 10^{-34})] \text{ Hz}$.

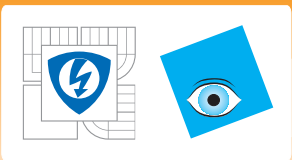


projekt Avogadro

problémy:

- povrchová oxidace



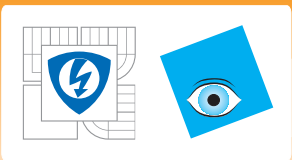


projekt Avogadro

problémy:

- povrchová oxidace
- izotopické složení koule, tj. poměr ^{28}Si , ^{29}Si , ^{30}Si



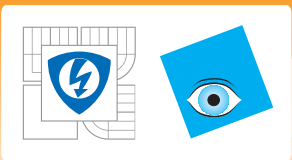


projekt Avogadro

problémy:

- povrchová oxidace
- izotopické složení koule, tj. poměr ^{28}Si , ^{29}Si , ^{30}Si
- jiné nečistoty, vakance



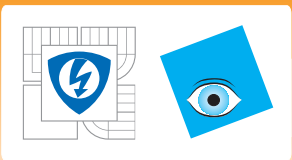


projekt Avogadro

problémy:

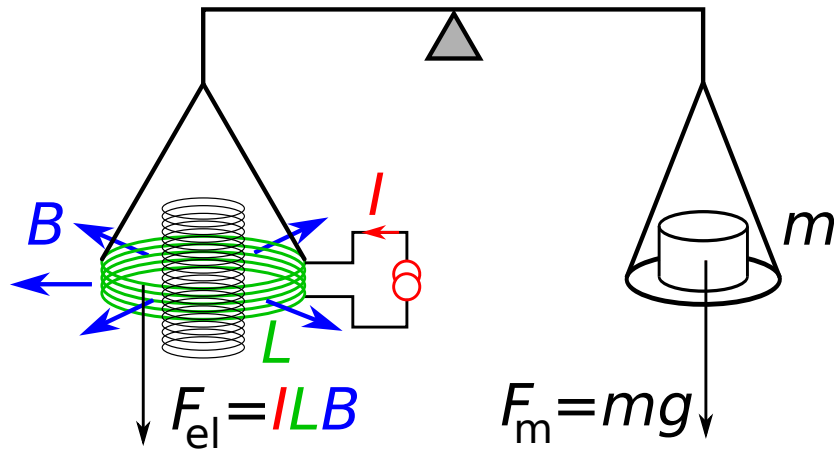
- povrchová oxidace
- izotopické složení koule, tj. poměr ^{28}Si , ^{29}Si , ^{30}Si
- jiné nečistoty, vakance
- určení objemu a hustoty (mřížková konstanta)



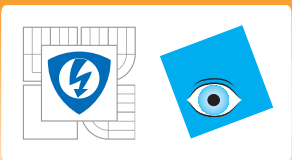


Watové váhy

vážení:
statické měření

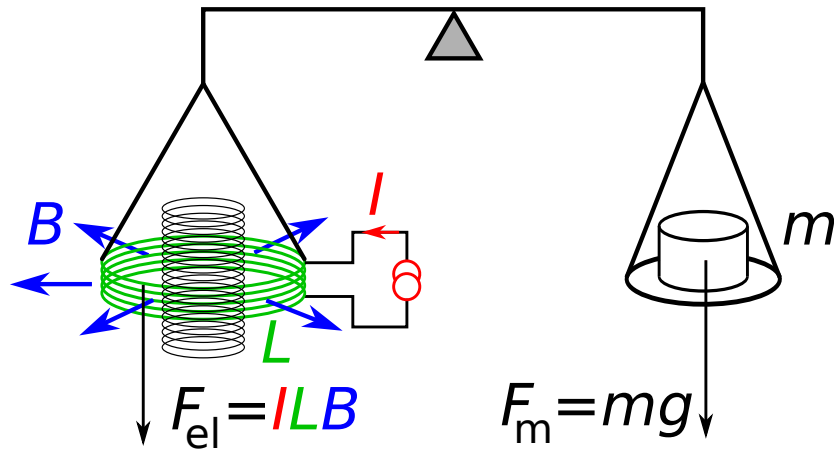


$$mg = ILB$$



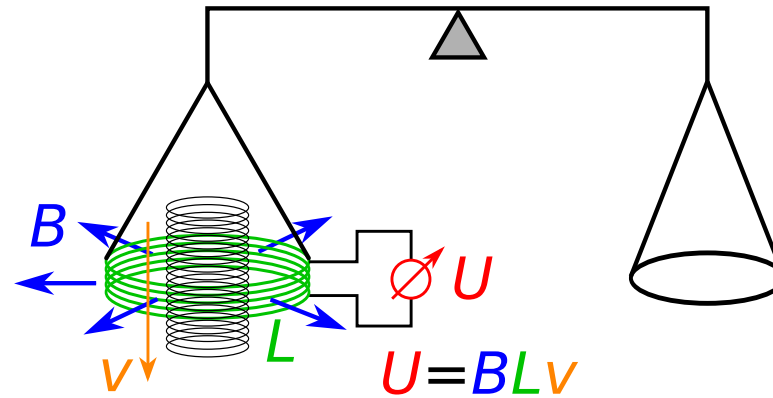
Watové váhy

vážení:
statické měření

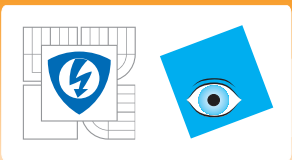


$$mg = ILB$$

měření vlastností cívky:
dynamické měření

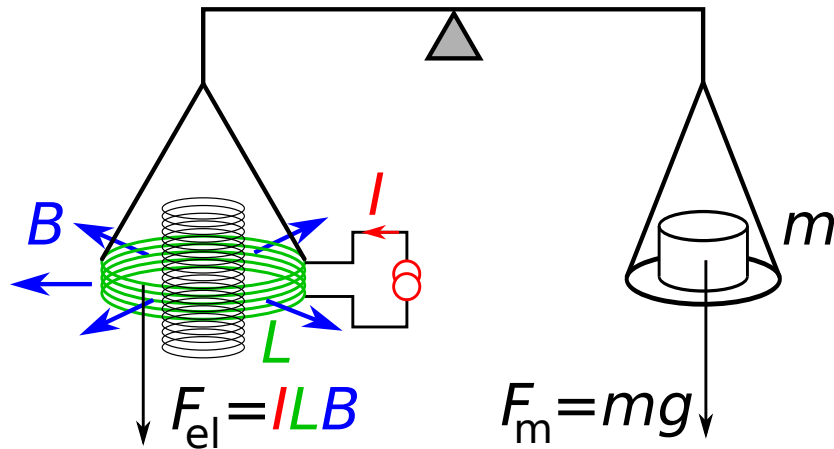


$$U = BLv$$



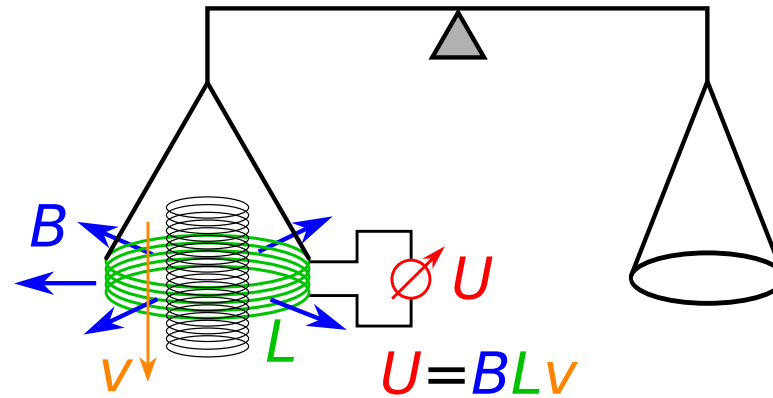
Watové váhy

vážení:
statické měření



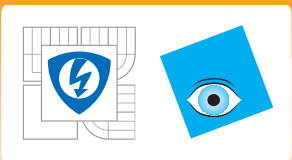
$$mg = ILB$$

měření vlastností cívky:
dynamické měření

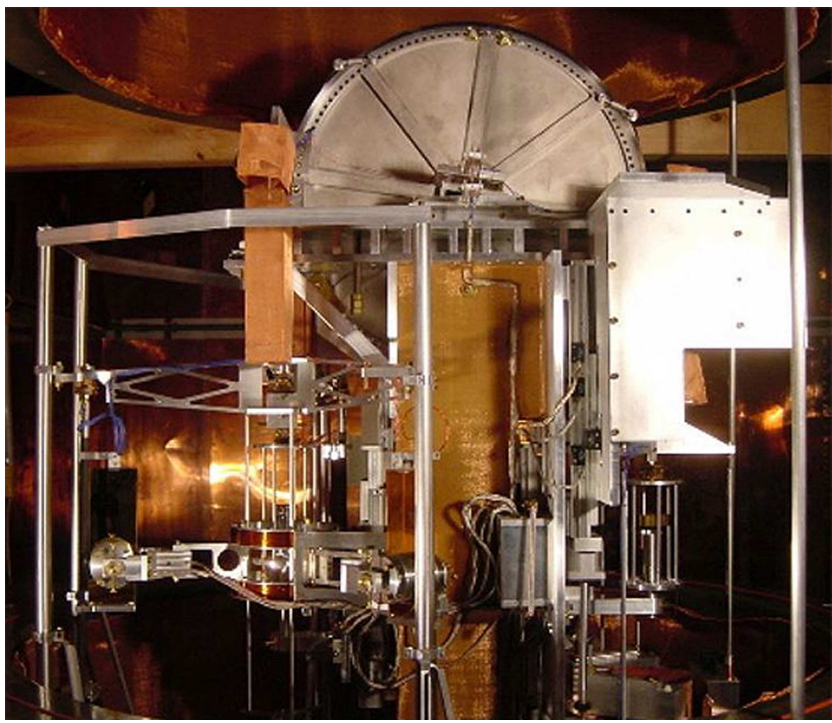


$$U = BLv$$

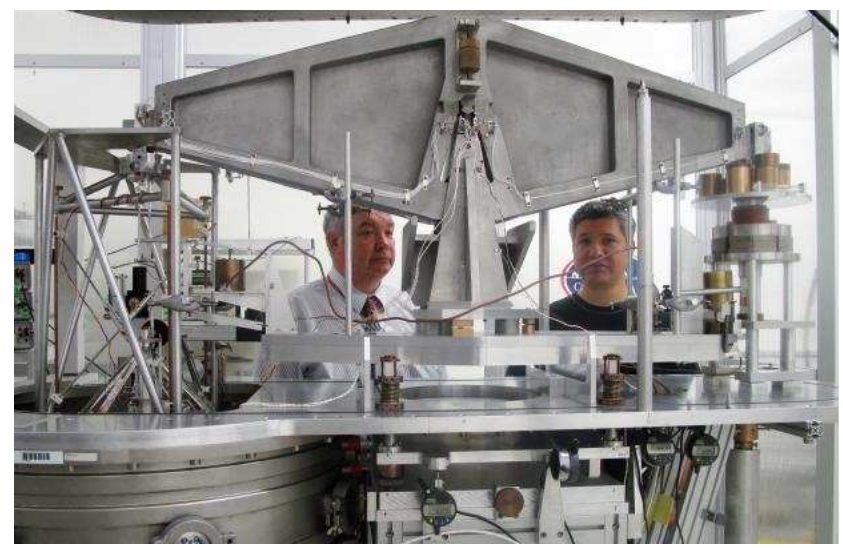
$$mgv = UI = \frac{h}{4} K_{J-90}^2 R_{K-90} UI$$



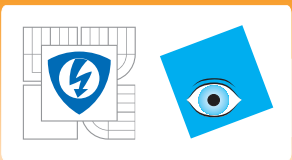
Watové váhy



projekt NIST (USA)

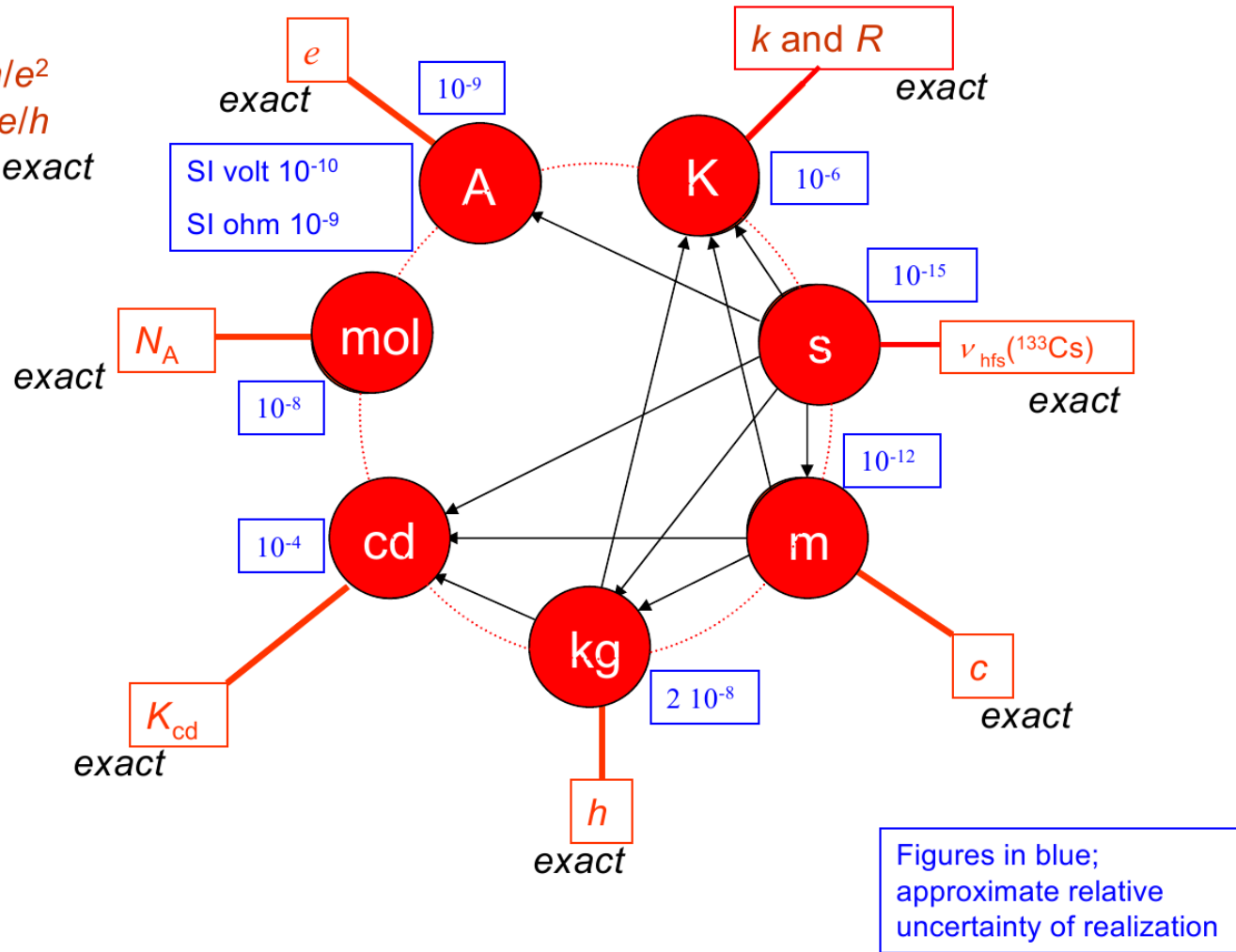


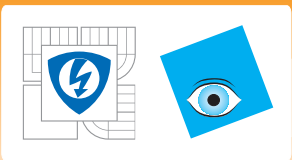
projekt NPL (VB)



Možný budoucí systém SI – kvantová SI

$R_K: h/e^2$
 $K_J: 2e/h$
 both exact

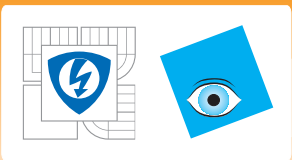




Návrh nové definice Ampéru

The ampere is the unit of electric current; its magnitude is set by fixing the numerical value of the elementary charge to be equal to exactly $1.602176487 \times 10^{-19}$ when it is expressed in the unit ampere second, which is equal to coulomb.

From Draft Chapter 2 (1st April 2010) of the SI Brochure

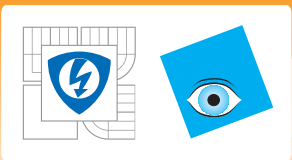


Návrh nové definice Ampéru

The ampere is the unit of electric current; its magnitude is set by fixing the numerical value of the elementary charge to be equal to exactly $1.602176487 \times 10^{-19}$ when it is expressed in the unit ampere second, which is equal to coulomb.

From Draft Chapter 2 (1st April 2010) of the SI Brochure

Důsledek: μ_0 a ϵ_0 nebudou známy přesně, ale budou muset být změřeny!



Děkuji
za pozornost

