

Kvantové etalony v metrologii elektrických veličin

Martin Šíra

Český metrologický institut



Obsah

- 1 Metrologie
- 2 Napětí
- 3 Odpor
- 4 Proud
- 5 Metrologický trojúhelník
- 6 Systém jednotek SI

Obsah

1 Metrologie

2 Napětí

3 Odpor

4 Proud

5 Metrologický trojúhelník

6 Systém jednotek SI

Co je to metrologie?

Metrologie: věda o měření.

Slovo pochází z řeckého *μέτρον* (metron, „měřit“) a *λόγος* (logos, „řeč, výpočet, důvod“)

Co je to metrologie?

Metrologie: věda o měření.

Slovo pochází z řeckého *μέτρον* (metron, „měřit“) a *λόγος* (logos, „řeč, výpočet, důvod“)

Neboli:

taková ta věda, pomocí které se správně určí ta čísylka za ±.

např. index lomu vzduchu je 1.0003 ± 0.0001 .

K čemu jsou národní metrologické instituty?

Hlavní úkoly ČMI (a jiných NMI) je:

K čemu jsou národní metrologické instituty?

Hlavní úkoly ČMI (a jiných NMI) je:

- **uchovávání a rozvoj** státních etalonů
- základní a aplikovaný **výzkum** v oblasti metrologie

K čemu jsou národní metrologické instituty?

Hlavní úkoly ČMI (a jiných NMI) je:

- uchovávání a rozvoj státních etalonů
- základní a aplikovaný výzkum v oblasti metrologie
- kalibrace měřidel, zkoušky, organizace zkoušení způsobilosti a mezilaboratorního porovnání zkoušek a certifikace referenčních materiálů
- technická realizace metrologické legislativy v praxi
- státní metrologický dozor

Co je to etalon?

Etalon je ztělesněná míra, měřicí přístroj, měřidlo, referenční materiál nebo měřicí systém, které jsou určeny k definování, realizování, uchovávání nebo reprodukování **jednotky** nebo jedné či více hodnot veličiny k použití pro referenční účely.

Druhy etalonů

- **Primární etalon** – té nejvyšší metrologické kvality, jeho hodnota je akceptována bez navázání na jiné etalony pro tutéž veličinu.
- **Referenční etalon** – má nejvyšší metrologické kvality v dané lokalitě (např. laboratoř)

Druhy etalonů

- **Primární etalon** – té nejvyšší metrologické kvality, jeho hodnota je akceptována bez navázání na jiné etalony pro tutéž veličinu.
- **Referenční etalon** – má nejvyšší metrologické kvality v dané lokalitě (např. laboratoř)
- **Artefakt** – hodnota etalonu je nastavena při výrobě
- **Intrinzičný etalon** – hodnota je dána fyzikálním jevem, chemickými vlastnostmi či konstantami.

Elektrické veličiny v metrologii

Hlavní:

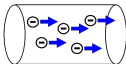
- napětí (V)



- odpor (Ω)



- proud (A)



Vedlejší:

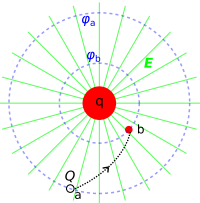
- amplituda stř.
napětí/proudu
- frekvence stř.
napětí/proudu
- elektrický výkon
- kapacita
- indukčnost
- impedance, ztrátový
činitel, reaktance, aj.

Obsah

- 1 Metrologie
- 2 Napětí**
- 3 Odpor
- 4 Proud
- 5 Metrologický trojúhelník
- 6 Systém jednotek SI

Definice Voltu v soustavě SI

Téměř každé dnešní měření je takové, že veličina je převedena na napětí. To je pak převedeno do digitální informace pomocí AD převodníků.



Jednotka: **volt**, symbol: **V**.

$$V = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$$

Volt **není** základní jednotka soustavy SI.

Volt (unit of potential difference and of electromotive force)

The volt is the potential difference between two points of a conducting wire carrying a constant current of 1 ampere, when the power dissipated between these points is equal to 1 watt.

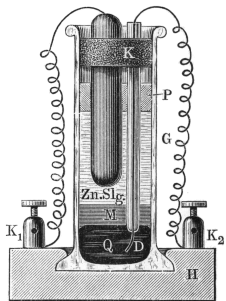
Historie jednotky

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.

1908 definice změněna a založena na mezinárodním ohmu a ampéru.



Clarkova chemická
baterie

Historie jednotky

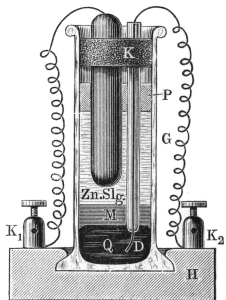
Jednotka mezinárodně ustanovena r. 1880.

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

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

1908 definice změněna a založena na mezinárodním ohmu a ampéru.

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



Clarkova chemická
baterie

Historie jednotky

Jednotka mezinárodně ustanovena r. **1880**.

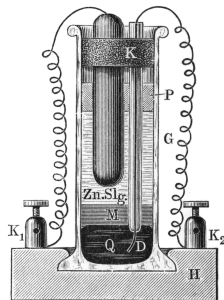
Definice: rozdíl potenciálů na vodiči, který disipoval jeden watt.

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

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



Clarkova chemická
baterie

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.

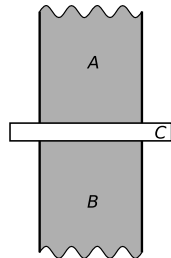
Josephson (1/2), Giaever a Esaki (1/2) získali Nobelovu cenu roku 1973.

Josephsonův jev

- **ss. Josephsonův jev:**

ss. proud prochází přes Joseph. přechod bez vytvoření napětí na izolátoru

Josephsonův přechod:



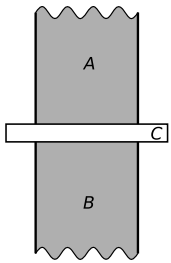
A, B:
supravodiče

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:

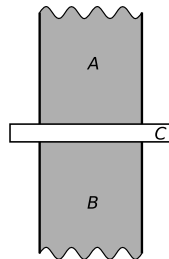


A, B:
supravodiče
C: izolant

Josephsonův jev

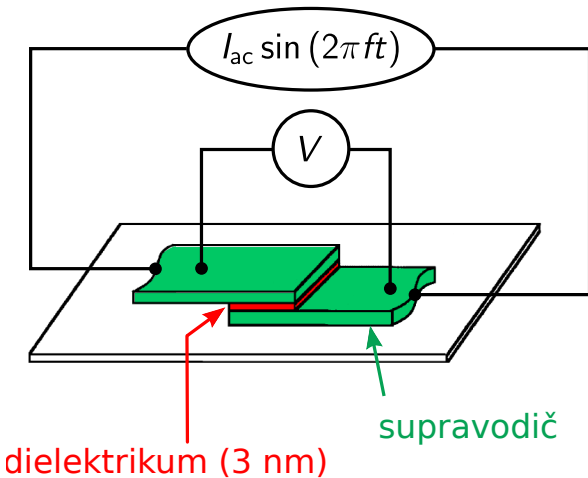
- **ss. Josephsonův jev:**
ss. proud prochází přes Joseph. přechod bez vytvoření napětí na izolátoru
- **stř. Josephsonův jev:**
přivedením ss. napětí na Joseph. přechod se vytvoří proudové oscilace.
Převodník napětí na frekvenci.
- **inverzní stř. Josephsonův jev:**
přivedením externího elmag. pole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

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

$$K_{J-90}$$

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 $n = \pm 4$.

Jeden přechod může generovat napětí:

$$n = -4 \quad V = -620.350 \text{ } \mu\text{V}$$

$$\vdots$$

$$n = -1 \quad V = -155.088 \text{ } \mu\text{V}$$

$$n = 0 \quad V = 0 \text{ } \mu\text{V}$$

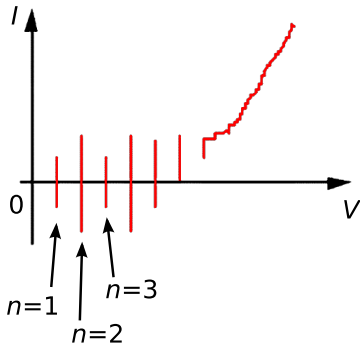
$$n = +1 \quad V = +155.088 \text{ } \mu\text{V}$$

$$\vdots$$

$$n = +4 \quad V = +620.350 \text{ } \mu\text{V}$$

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:

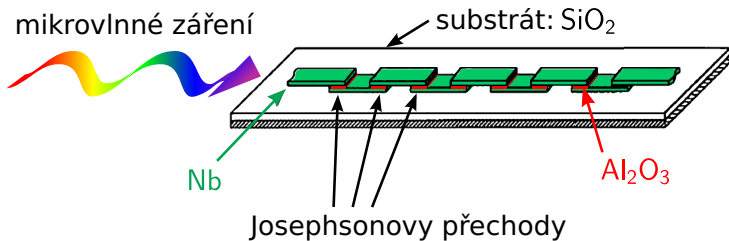
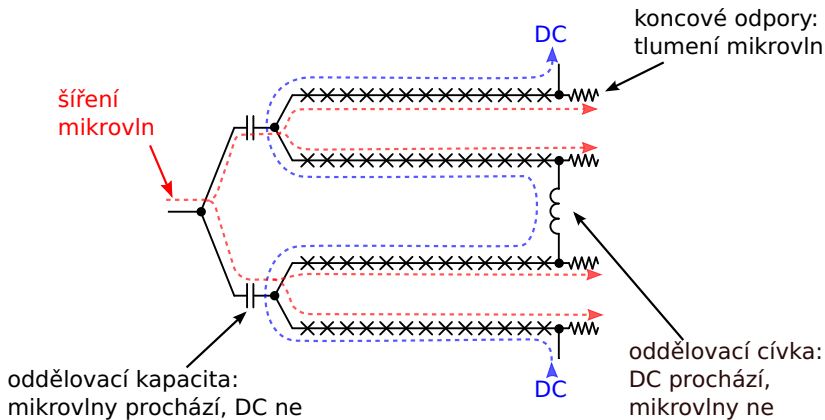


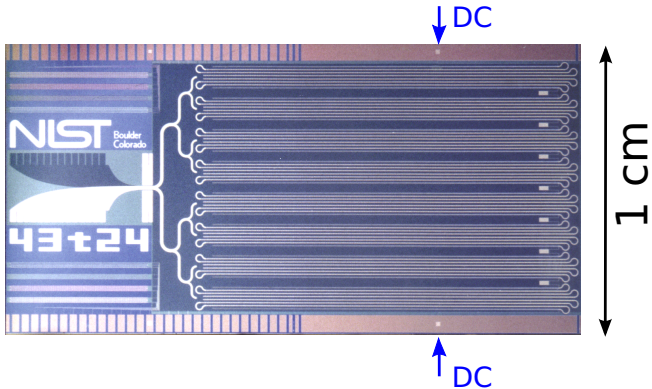
Schéma 10 V čipu

Mikrovlny se musí šířit rovnoměrně všemi J. přechody:



Snímek 10 V čipu

přívod
mikrovln
→



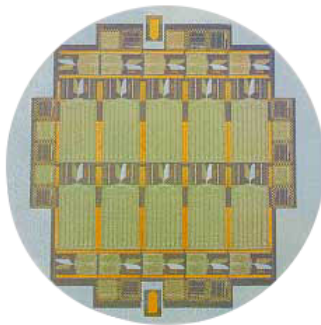
Josephsonovy čipy

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)

Etalon napětí – Josephson Voltage System (JVS)

JVS je složen z:

Etalon napětí – Josephson Voltage System (JVS)

JVS je složen z:

- čip s Josephsonovými přechody

Etalon napětí – Josephson Voltage System (JVS)

JVS je složen z:

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

Etalon napětí – Josephson Voltage System (JVS)

JVS je složen z:

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

Etalon napětí – Josephson Voltage System (JVS)

JVS je složen z:

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

Etalon napětí – Josephson Voltage System (JVS)

JVS je složen z:

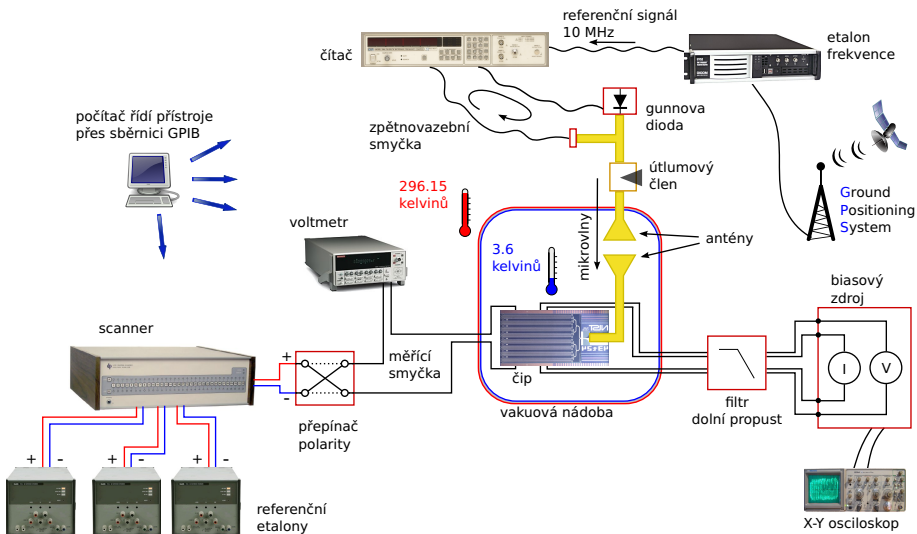
- čip s Josephsonovými přechody
- chlazení k dosáhnutí teploty 4 K
- zdroj mikrovln
- referenční etalon času
- řídicí zdroj

Etalon napětí – Josephson Voltage System (JVS)

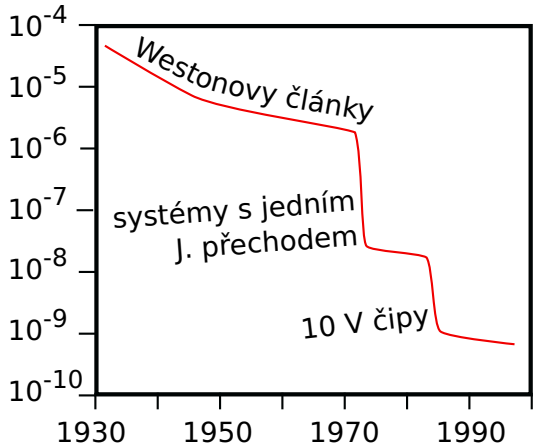
JVS je složen z:

- čip s Josephsonovými přechody
- chlazení k dosáhnutí 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**

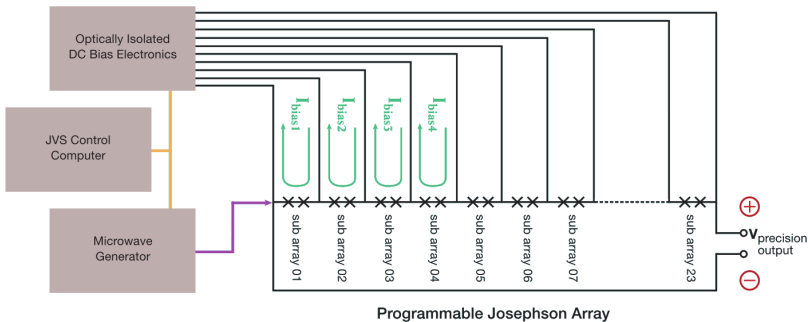
J. přechody excitovány pulsy záření

frekvence od ~ 1 kHz do ~ 1 MHz

maximální dosažené napětí 0,3 V

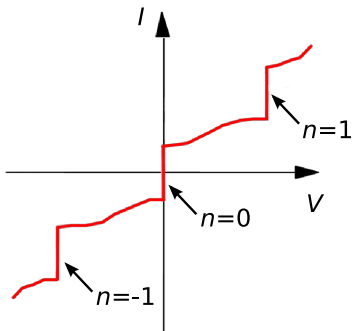
možnost generovat více harmonických frekvencí zároveň

Programovatelný JVS

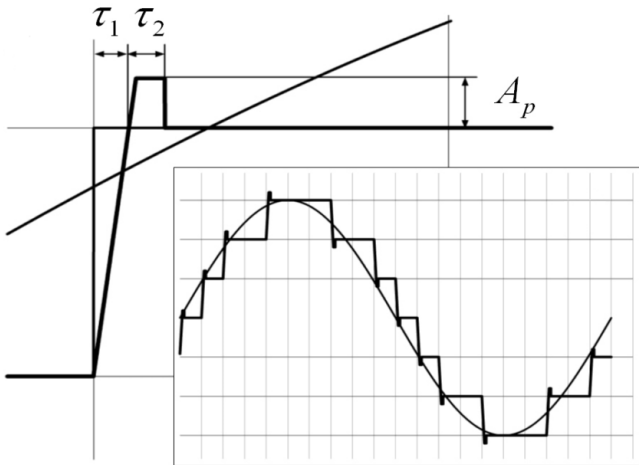


VA charakteristika – přechod s nízkou kapacitou

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



Programovatelný JVS



Definice Ohmu v soustavě SI

Primární etalon odporu založený na kvantovém Hallově jevu závisí pouze na konstantách e a h , proto bude důležitou součástí nové soustavy SI.



Jednotka: **Ohm**, symbol: Ω .

$$R = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-2}$$

Ohm **není** základní jednotka soustavy SI.

Ohm (unit of electric resistance)

The ohm is the electric resistance between two points of a conductor when a constant potential difference of 1 volt, applied to these points, produces in the conductor a current of 1 ampere, the conductor not being the seat of any electromotive force.

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 měř 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 měr 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:

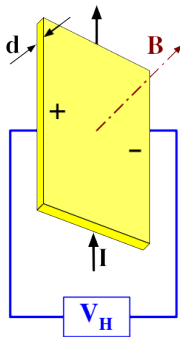
$$V_H = \frac{-IB}{dne}$$

n je hustota nosičů napětí.

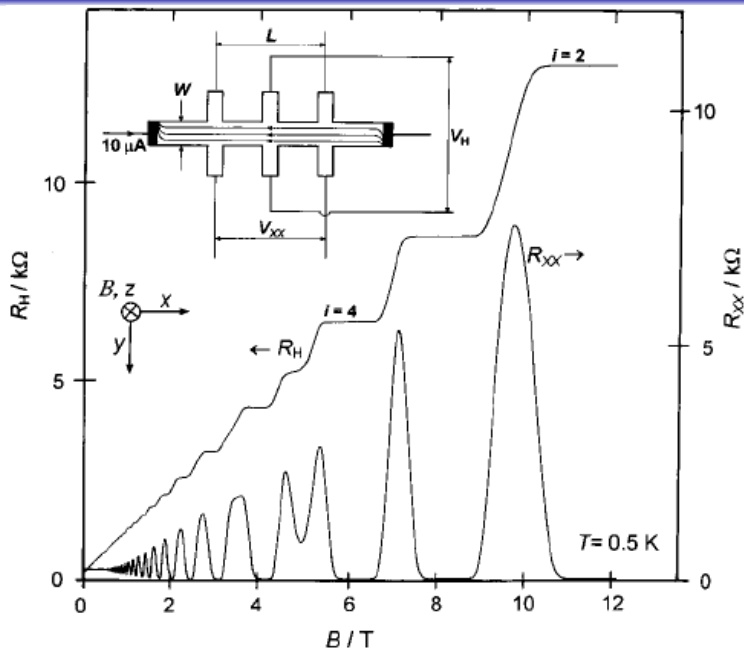
Hallův koeficient (odpor):

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

j_x je proudová hustota.



Kvantový Hallův jev



Materiály heterostruktury

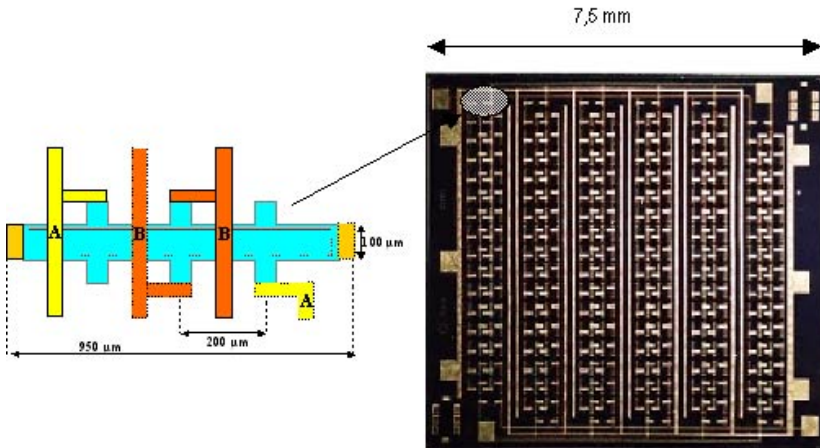
Nejčastější materiál:

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

Maximální proud je cca. **100** μA .

Quantum Hall Arrays – QHARS

Sériově nebo paralelně zapojené Hall bar.



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

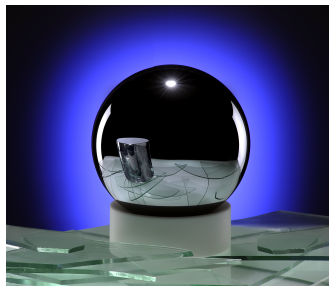
Obsah

- 1 Metrologie
- 2 Napětí
- 3 Odpor
- 4 Proud**
- 5 Metrologický trojúhelník
- 6 Systém jednotek SI

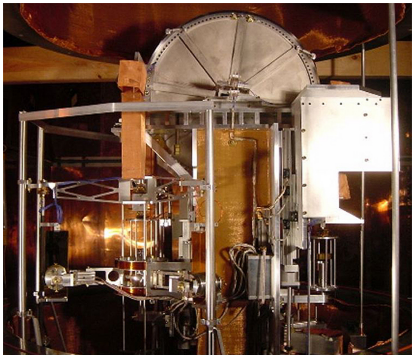
projekt Avogadro

problémy:

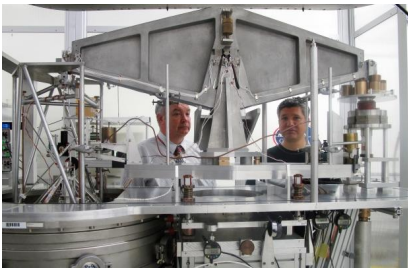
- povrchová oxidace



Watové váhy



projekt NIST (USA)



projekt NPL (VB)

