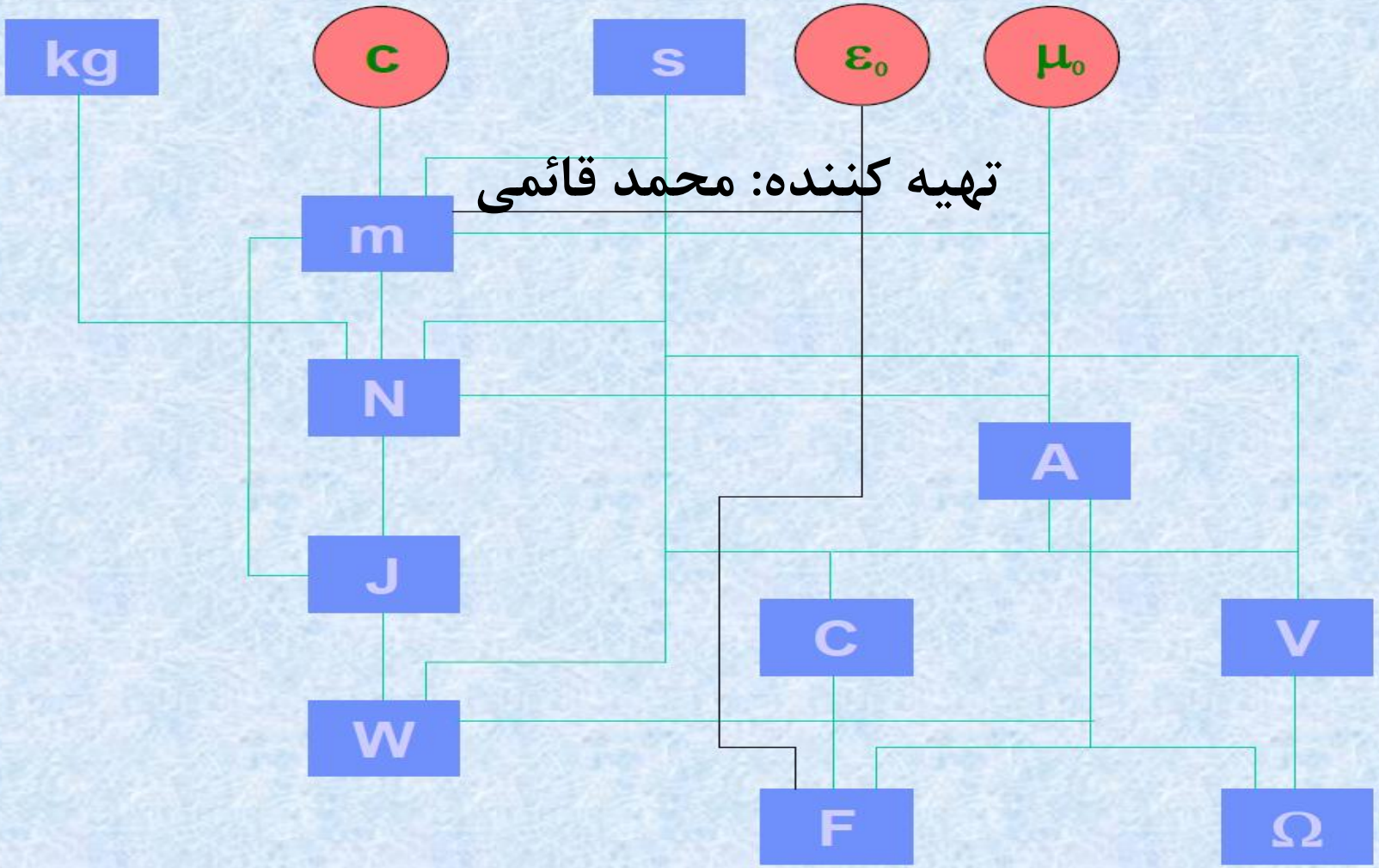
اندازه شناسی الکتریک



تهیه کننده: محمد قائمی

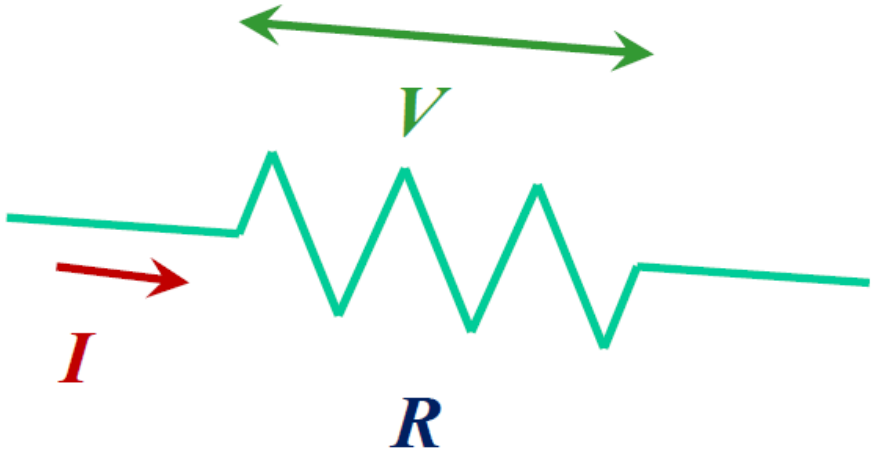
برگفته از www.nist.gov

با تشکر فراوان
از
معاونت محترم مرکز ملی تایید صلاحیت ایران
سرکارخانم مهندس حلوانی
و
جناب آقای مهندس صالحی
به جهت همراهی در تهیه و پشتیبانی

سر فصل ها:

- واحدهای الکتریک در SI
- واحدهای الکتریک در NMI یا DI
- تحقق بخشیدن به واحدهای الکتریکی
- قابلیت ردیابی واحدهای الکتریکی
- روش های اندازه گیری
- مسائل اندازه گیری

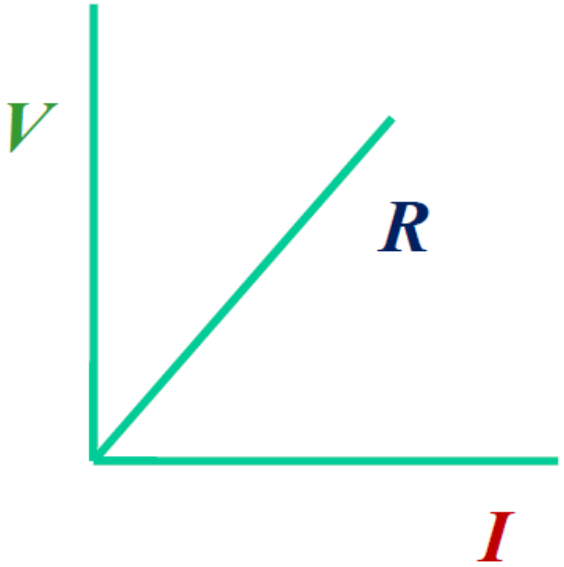
یادآوری۱:



R – مقاومت

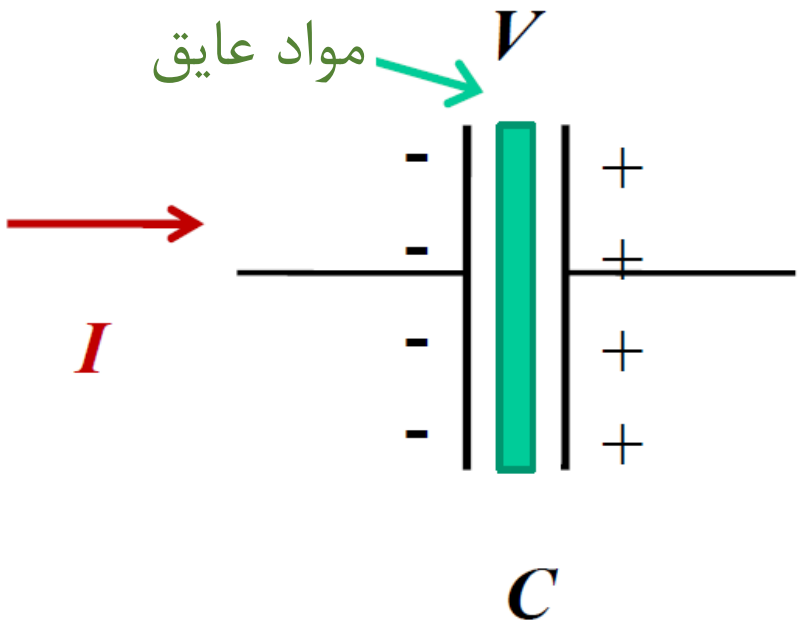
V – اختلاف ولتاژ

I - جریان



قانون اهم : $I = V / R$

یادآوری ۲:



C - ظرفیت

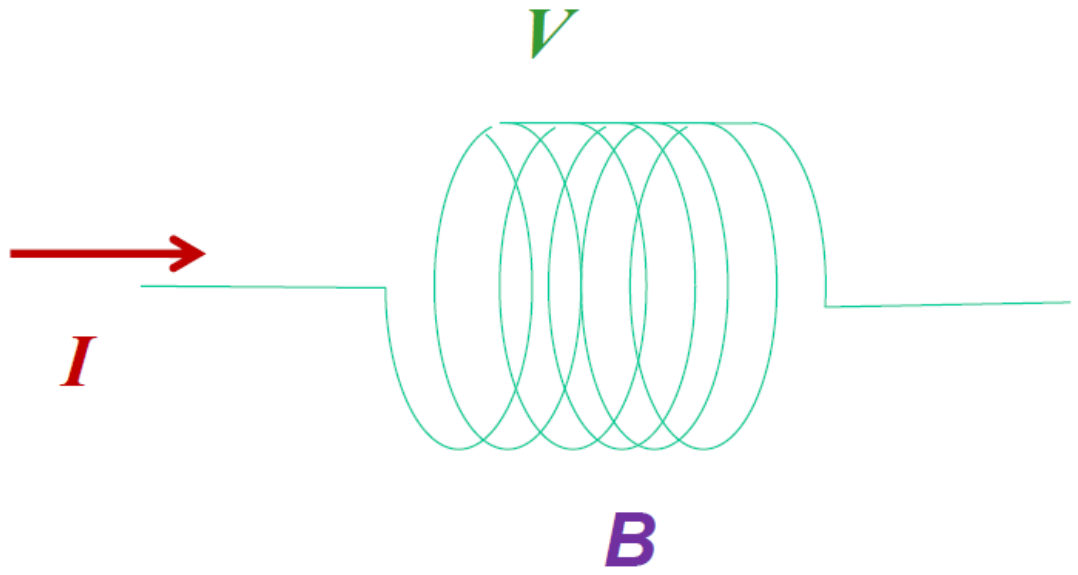
A – ناحیه

D - فاصله بین دی الکتریک

E - توانایی ذخیره انرژی الکتریکی

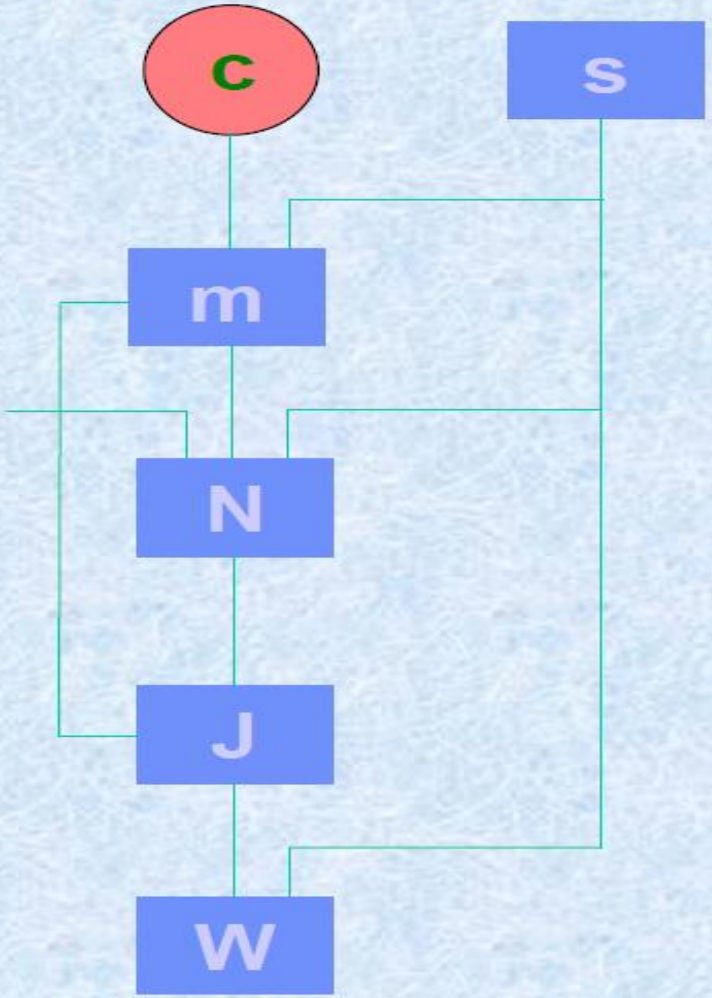
$$C = \varepsilon \frac{A}{d}$$

یادآوری ۳:



B – میدان مغناطیسی القا شده در سیم پیچ

سلسله مراتب واحد های SI – واحدهای مکانیکی



ثابت های بنیادی

c - سرعت حرکت نور

SI Mechanical Units

kg - mass of PtIr at BIPM

s hyperfine splitting of Cs

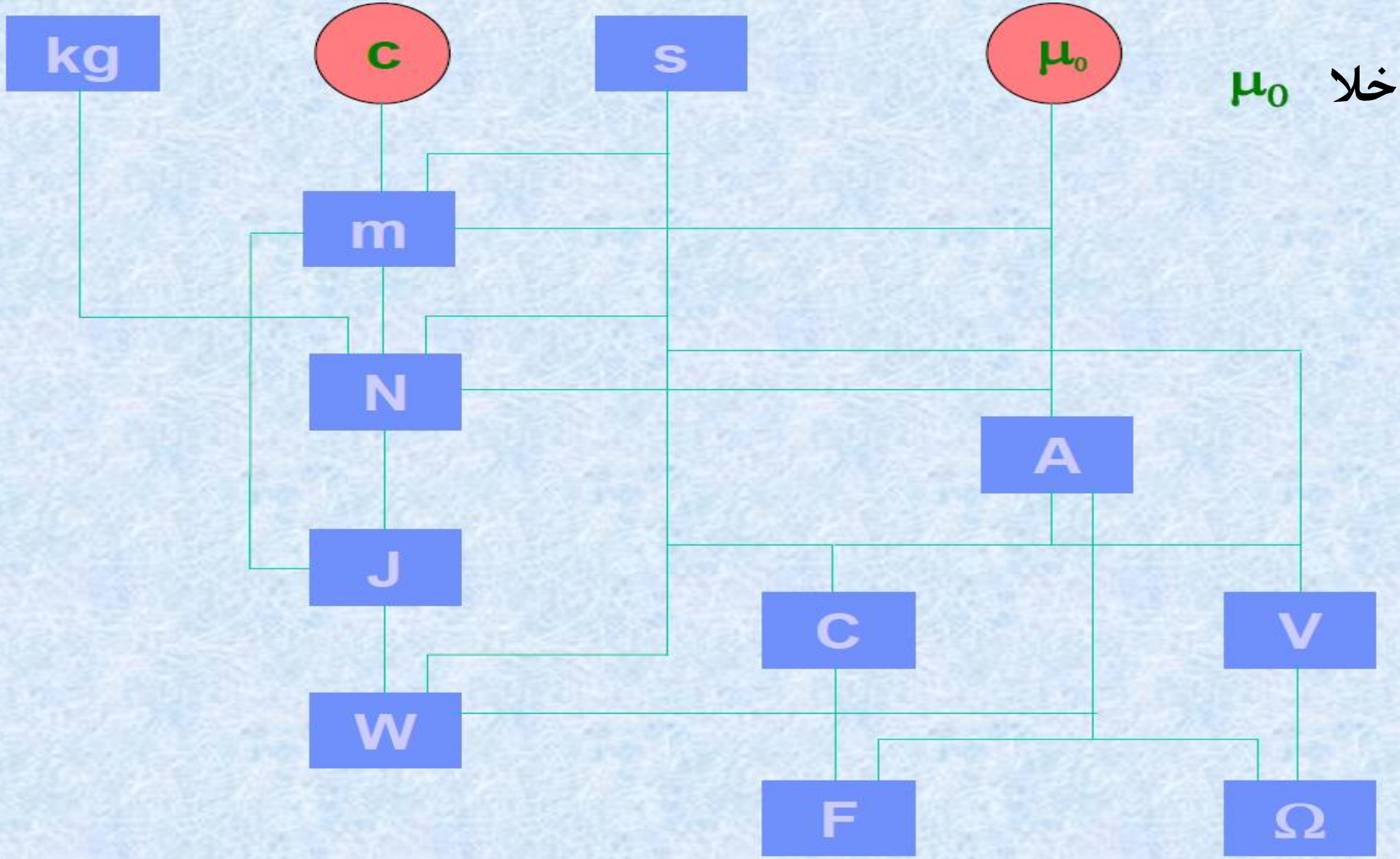
m meter of length

N newton of force

J joule of work

W watt of energy

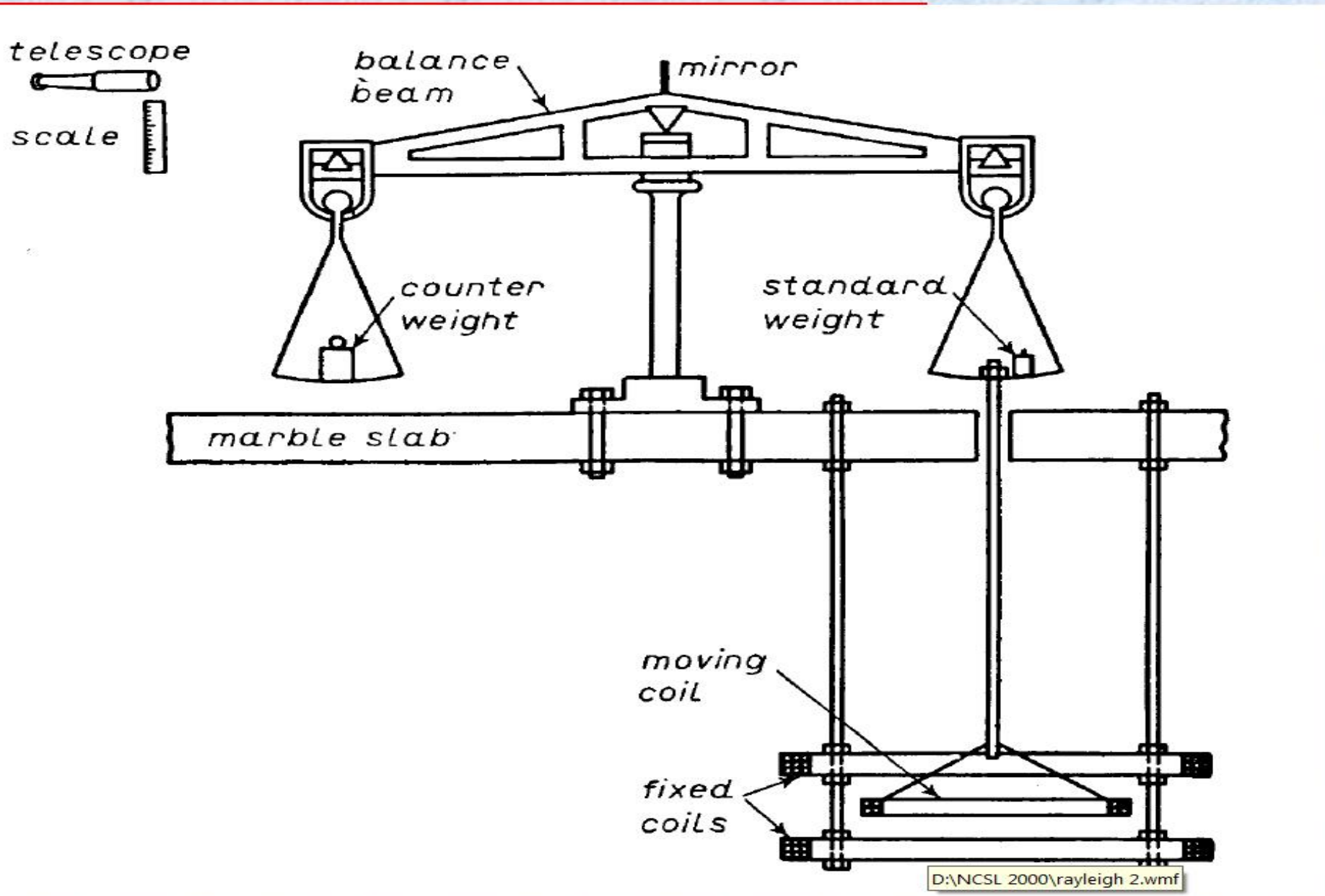
سلسله مراتب واحد های SI – واحدهای الکتریکال



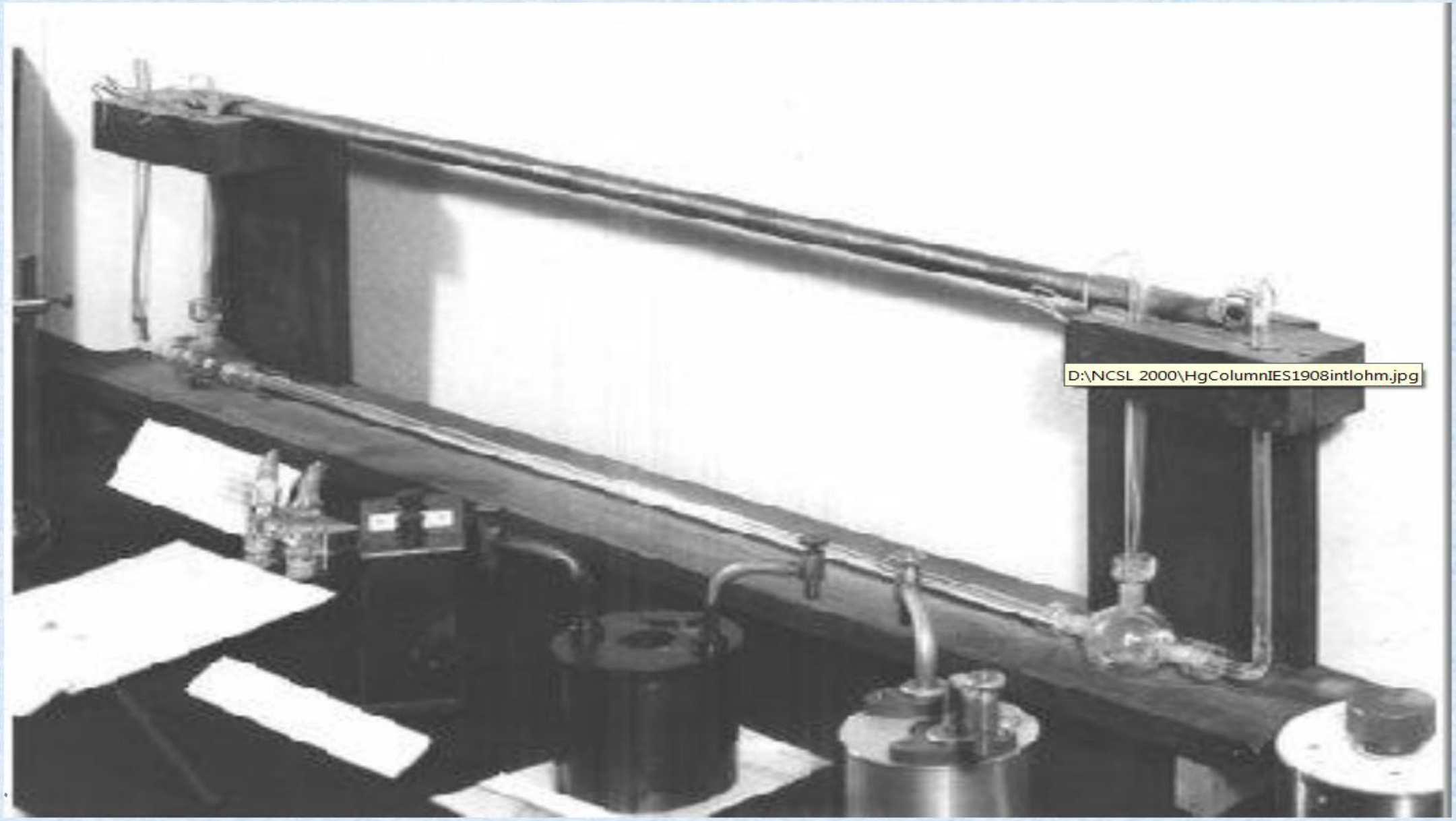
μ_0 نفوذپذیری خلا

(1948)

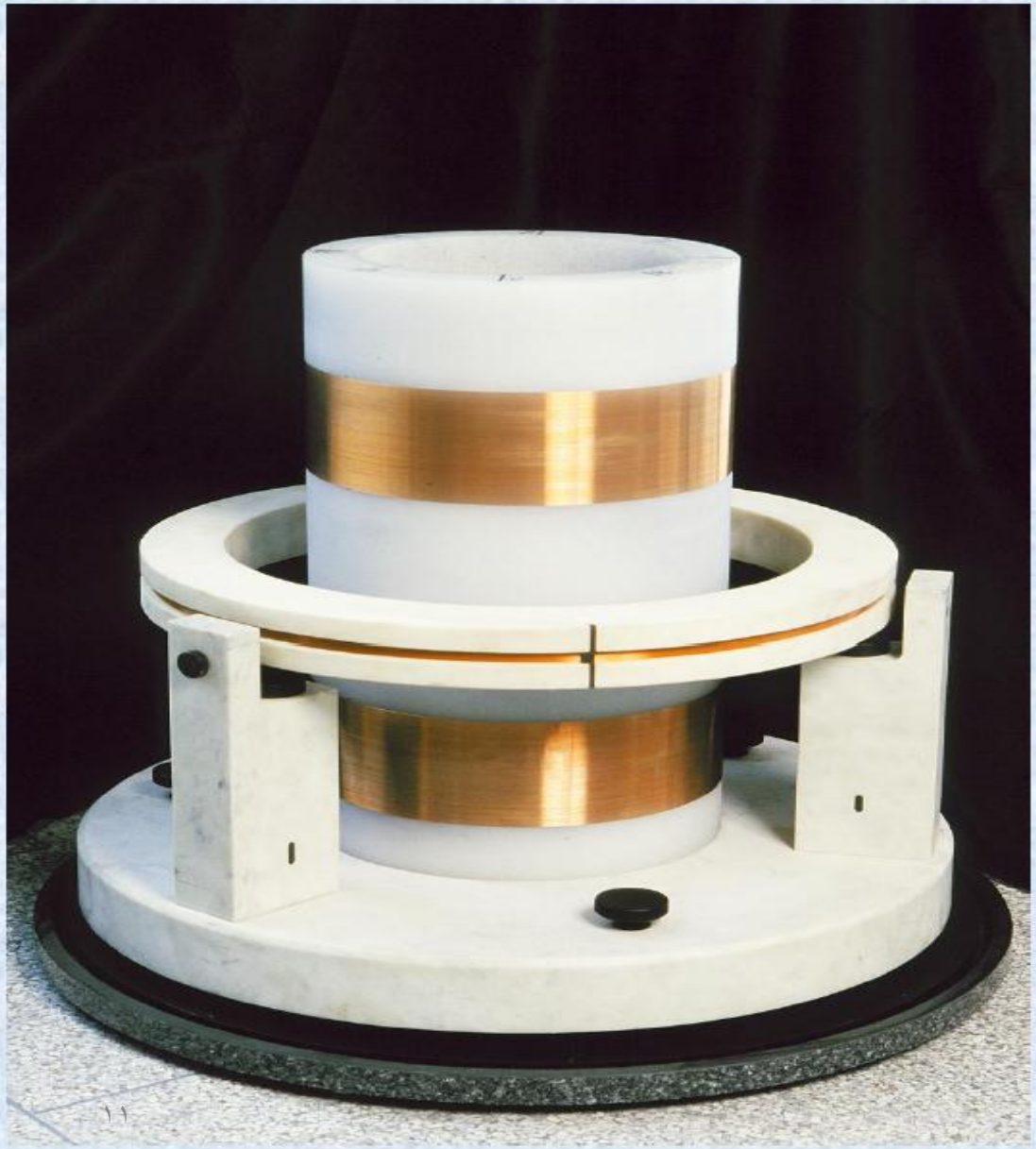
تعادل آمپر Rayleigh



١٩٠٨ اهم مطلق – Mercury column



سلف متقابل *Campbell* ۱۹۵۰



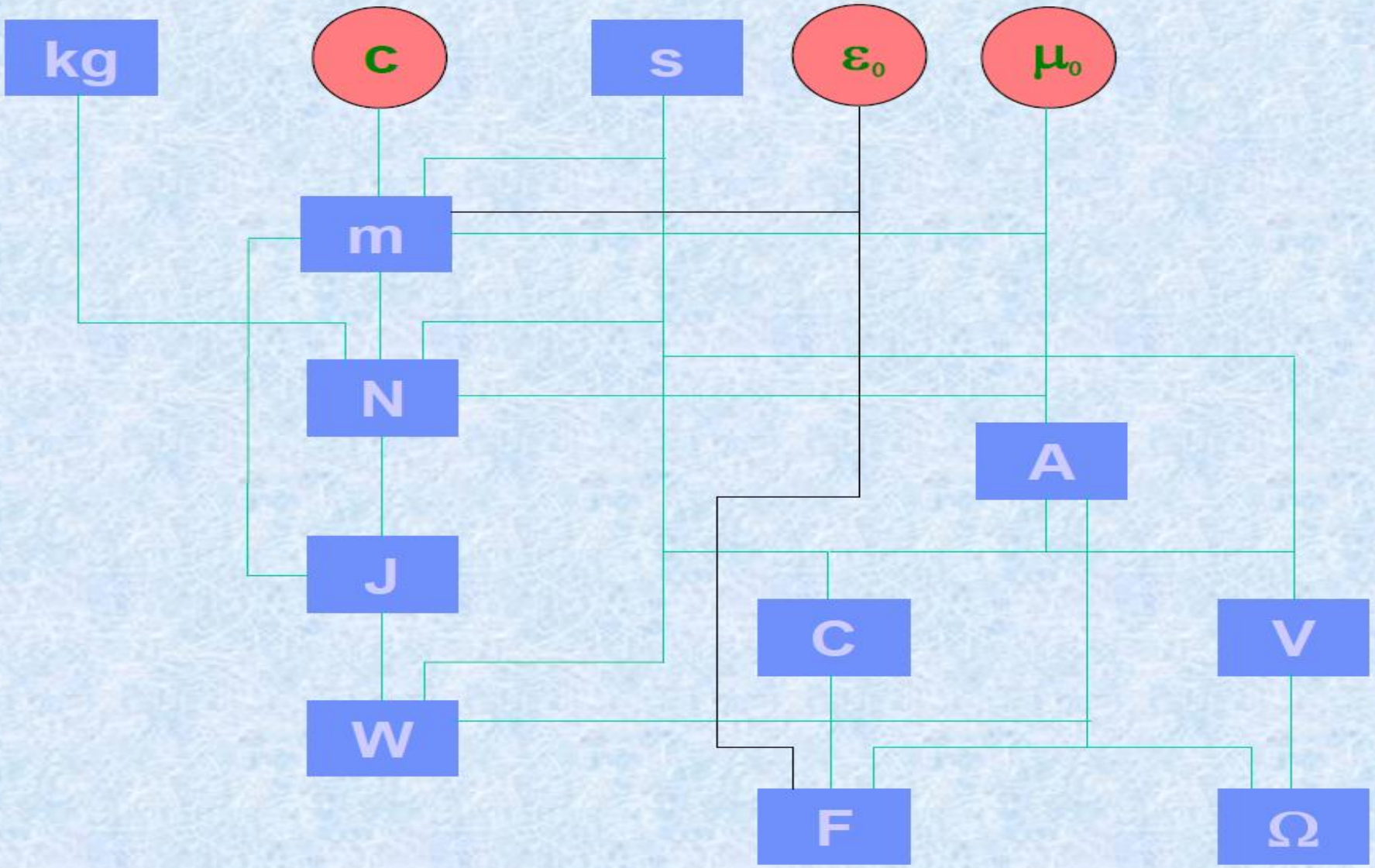
- درسال ۱۹۰۷ محاسبه خواص القایی از طریق محاسبه خواص ابعادی انجام می گرفت.

-تکنیک های نسبت گیری از طریق اهم در سال های بین ۱۹۵۰ تا ۶۰ مرسوم شد.

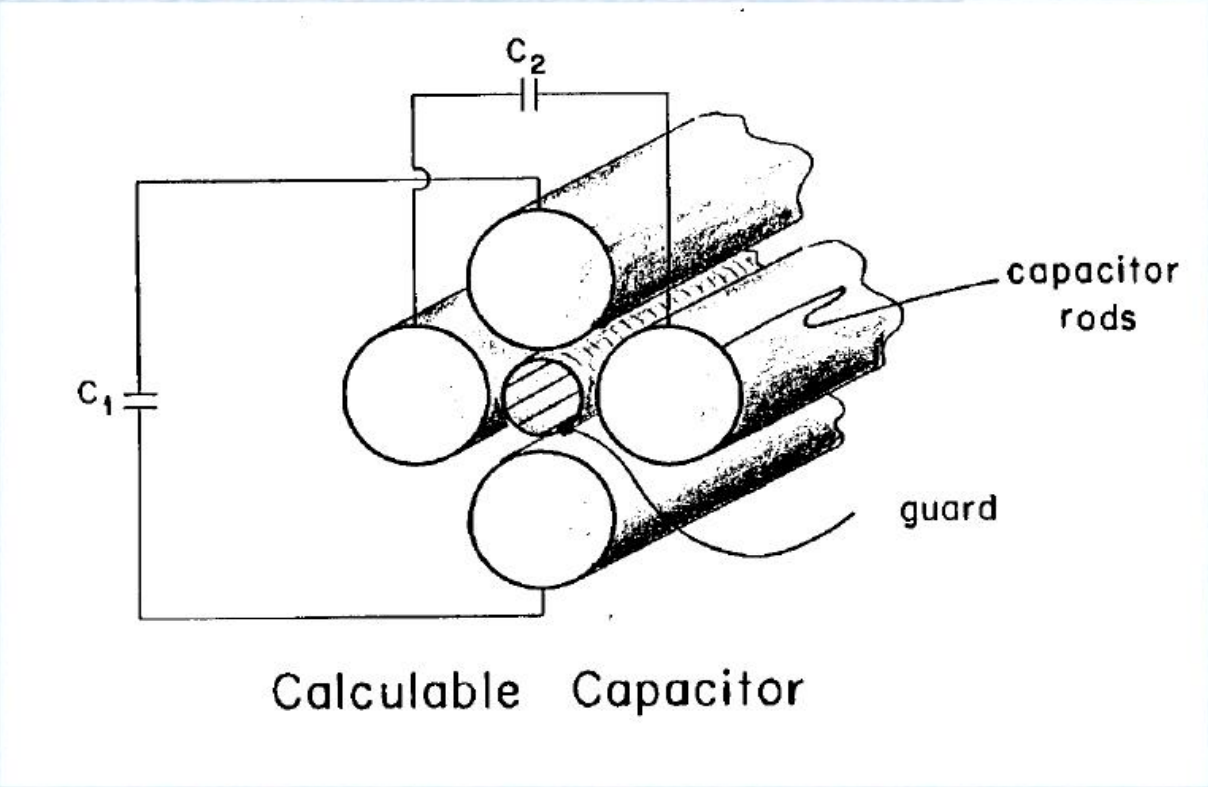
- این روش دارای مشکلاتی از قبیل توزیع جریان، اعوجاج و مقاومت سیم و ... بود.

- درستی این روش در حدود چند ppm بود.

سلسله مراتب واحد های SI – محاسبه ظرفیت خازنی



محاسبه ظرفیت خازنی ۱۹۷۰



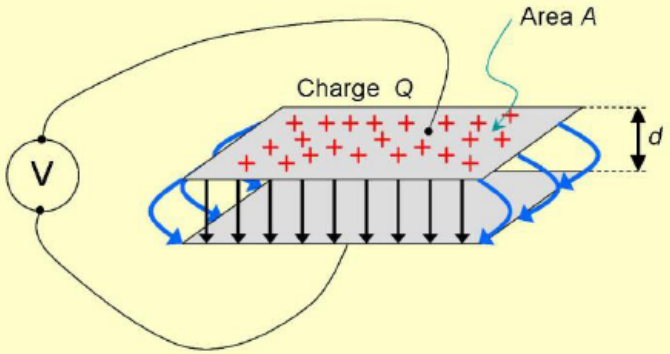
$$C = \frac{\varepsilon_0}{\pi}\ln(2) \quad F/m$$

Quadrature bridge resistance
10pF @ ~ 0.01 ppm

ـ از این پل عمدتا جهت اندازه گیری ظرفیت خازنی استفاده می شود و ساخت آن مشکل است.

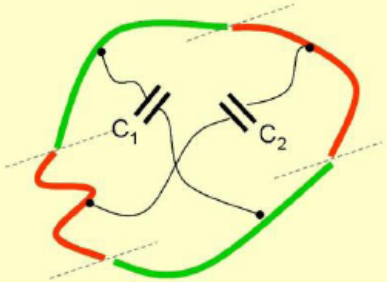
1 kHz, $\Delta l \approx 0.2$ m, $\Delta C \approx 0.4$ pF
(but see *NIST* special)

یادآوری ۴:



Simple parallel Plate capacitor

$$C = Q/V \qquad C = \frac{\varepsilon_0 A}{d}$$

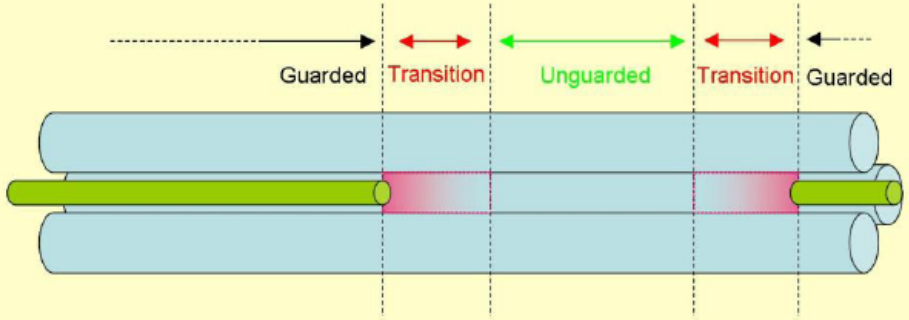


Thompson Lampard Theorem:

System of infinite parallel conductors
C_1 and C_2 are cross capacitances per unit length

$$\exp\left(-\pi C_1/\varepsilon_0\right) + \exp\left(-\pi C_2/\varepsilon_0\right) = 1$$

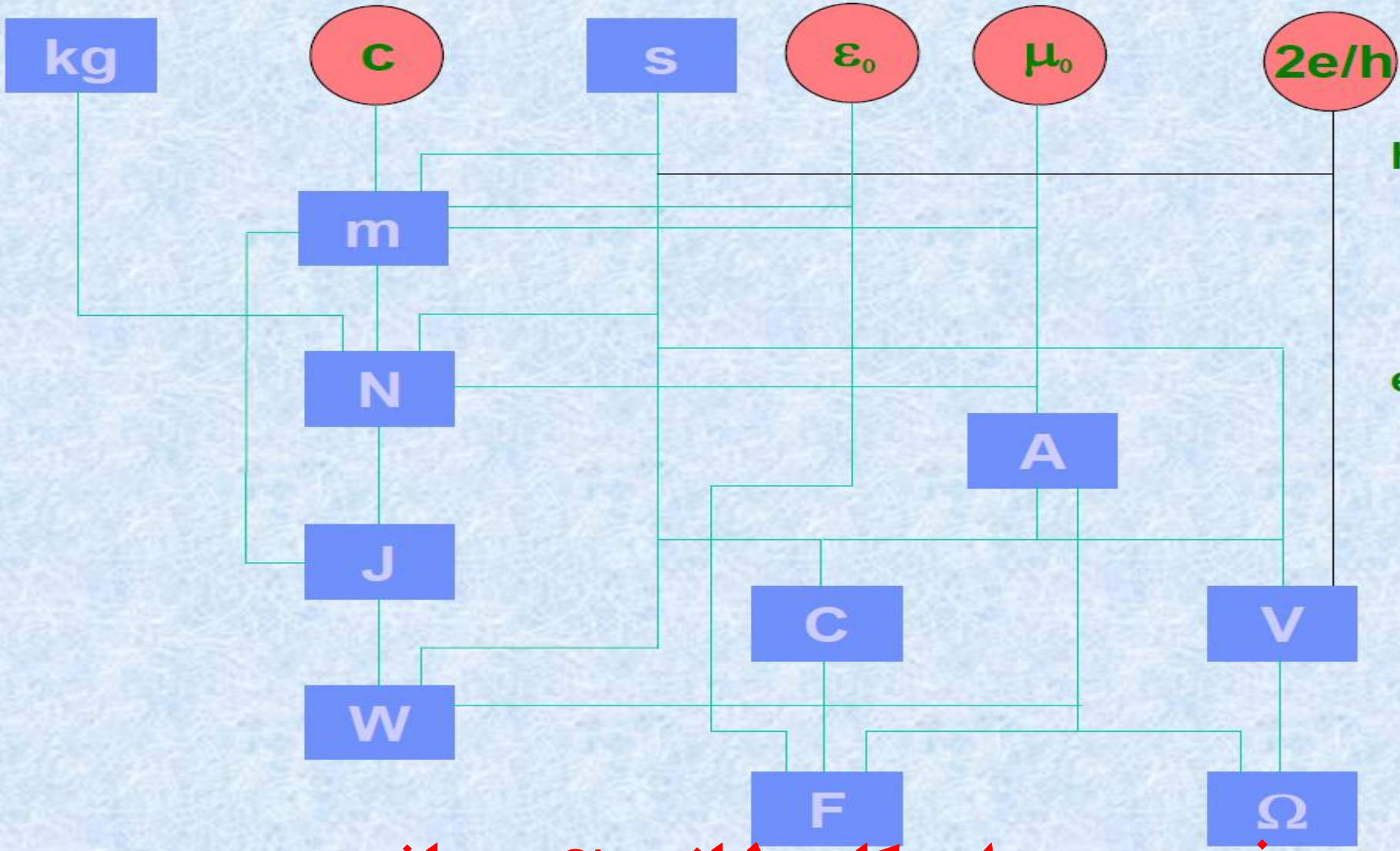
Practical realisation of a calculable cross capacitor



4 cylindrical bars and a central guard bar

BIPM web-site
Oct. 2013

سلسله مراتب واحد های SI – اثر جوزفسون



ثابت پلانک h

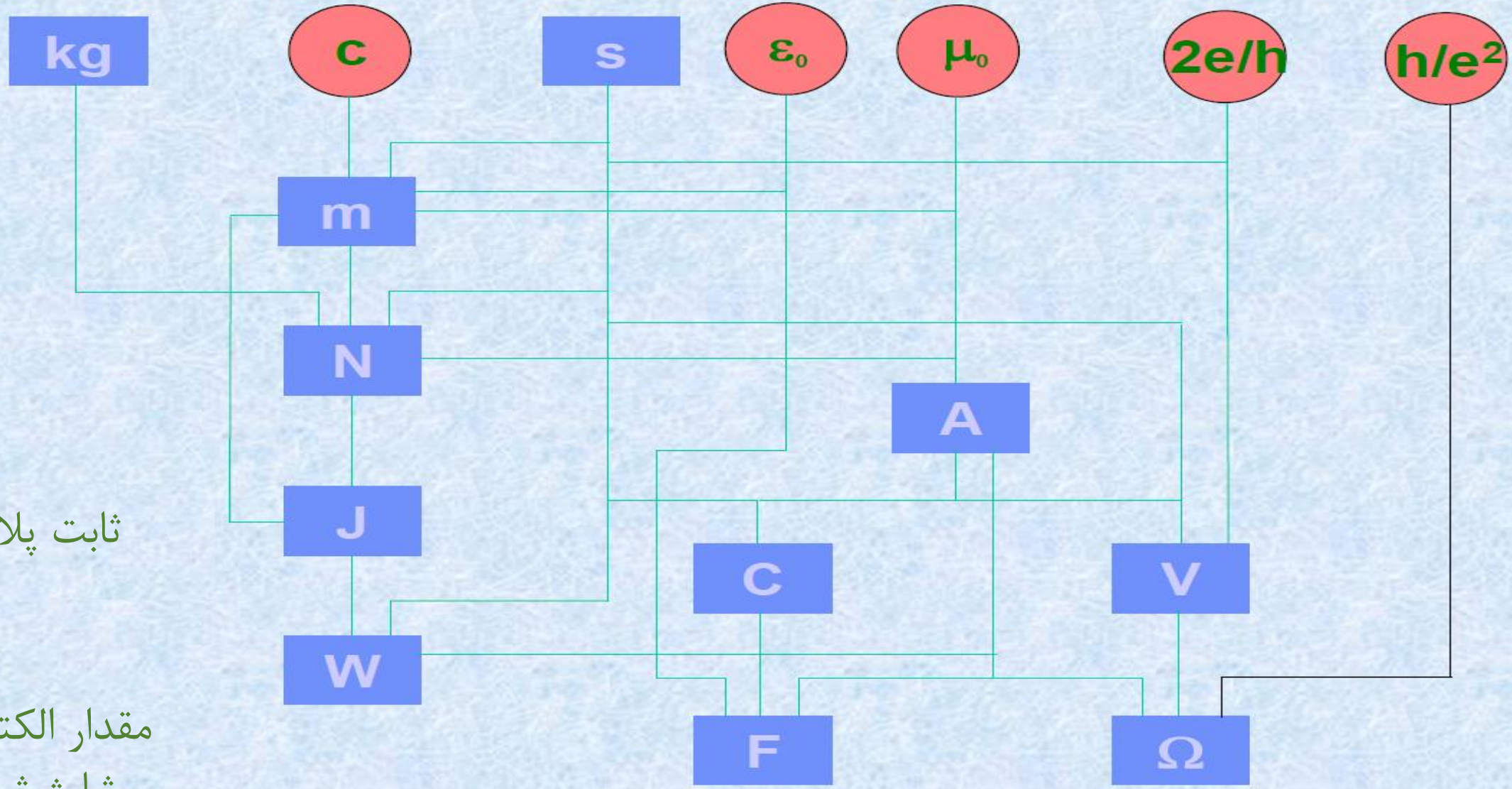
:

مقدار الکترون e
شارژ شده

اثر جوزفسون به عنوان یکای ولتاژ در SI می باشد

سلسله مراتب واحد های SI – در حال حاضر

ε_0 permittivity of vacuum



h ثابت پلانک

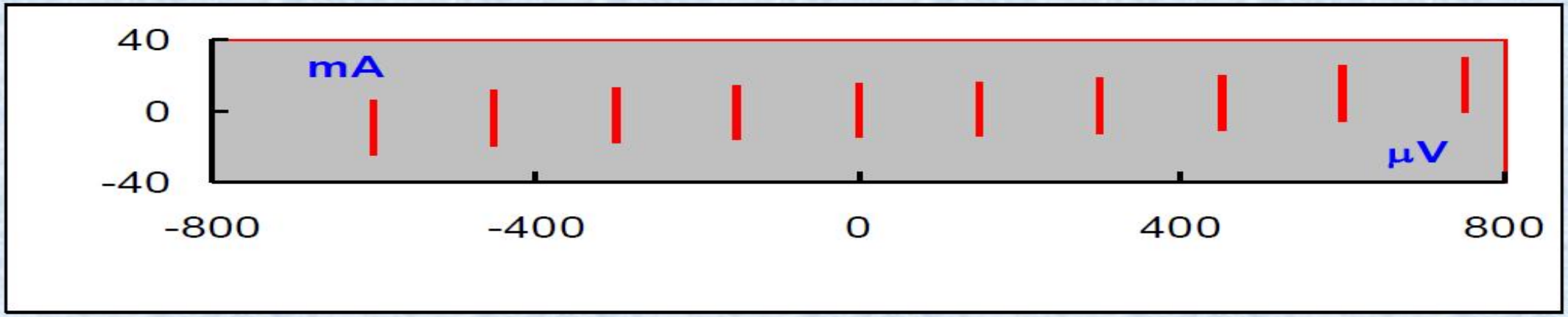
e مقدار الکترون شارژ شده

ولتاژ استاندارد اثر جوزفسون

-یک اتصال جوزفسون هنگامی تشکیل می شود که دو ابررسانا با یک پیوند ضعیف از هم جدا شوند ، که اجازه می دهد تا زوج الکترون از طریق تونل منتقل شوند.

-جریان بایاس اعمال می شود و محل اتصال توسط تابش میکرو ویوو متشعشع می شود.

-منحنی IV زیر برای محل اتصال یک سری از گستره های منظم ولتاژ را نشان می دهد.



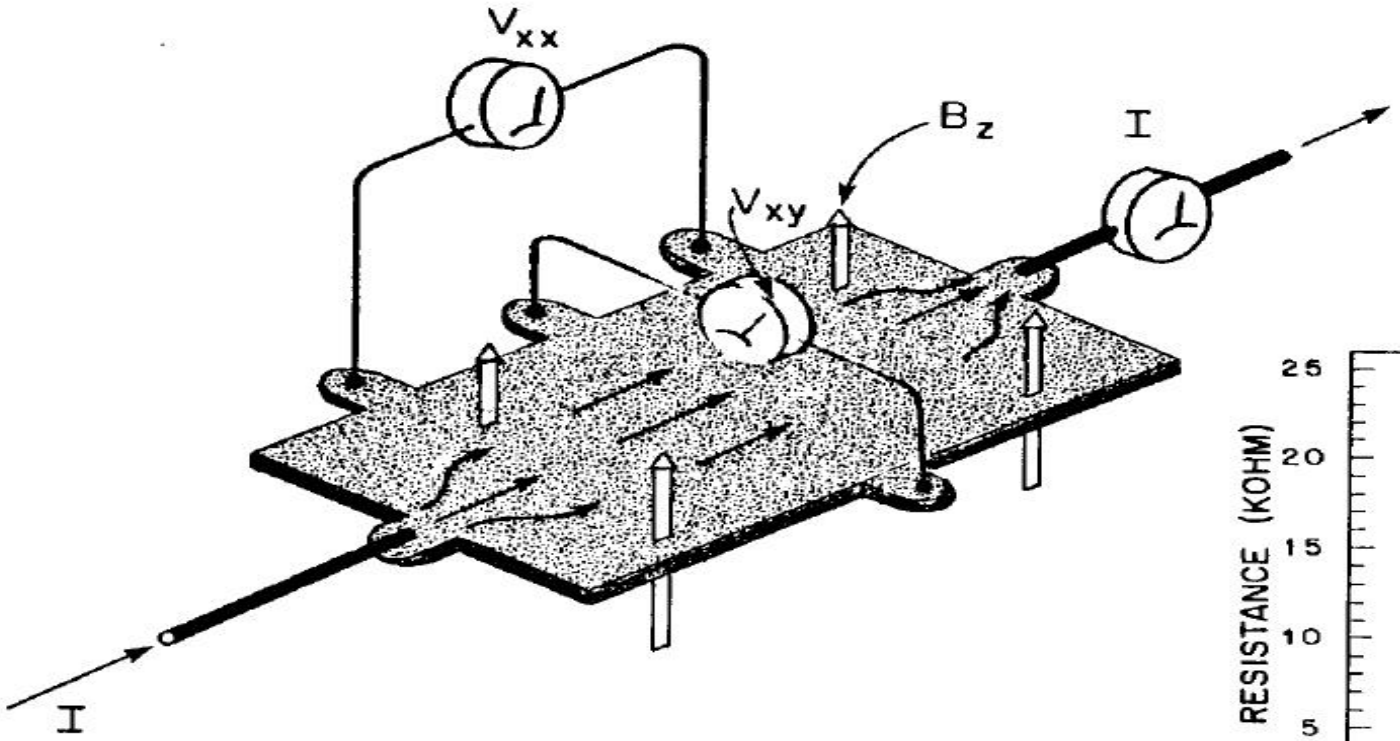
مقاومت کوانتوم هال–۱۹۹۰

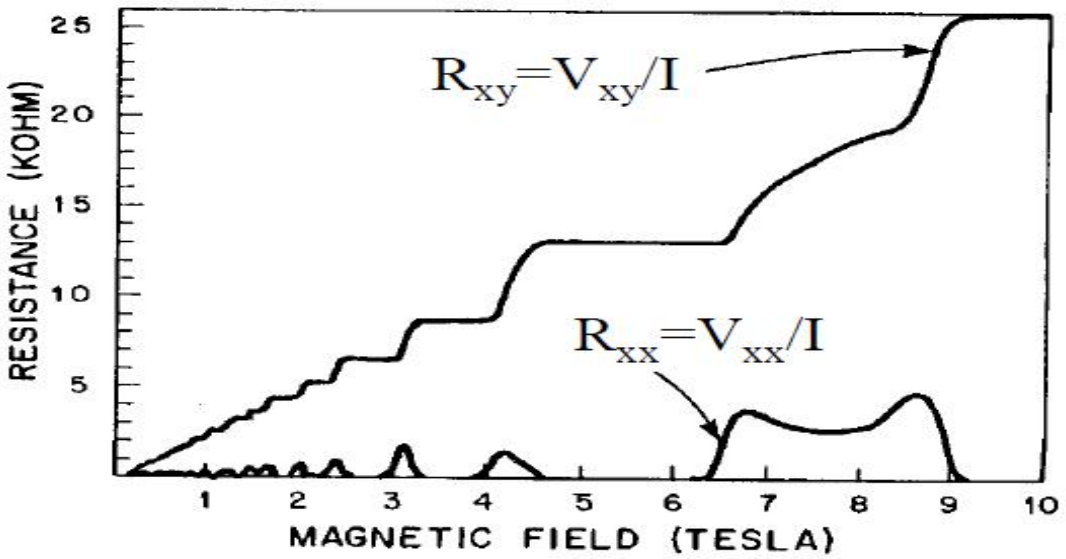
-بصورت بین المللی پذیرفته شده است.

-کاربری آسان

-RK-90 = 25812.807

- 0.003 ppm >درستی





ولتاژ

ولتاژ مستقیم ۰ تا ۱۰۰۰ ولت

-پیدایش ولتاژ جوزفسون-۱۹۹۰

-سلول های استاندارد، زنر ها

-کالیبراتورها، ولت متر های دیجیتال

-مقسم های ولتاژ

ولتاژ استاندارد جوزفسون

$V_n = n.(h/2e)\, f$ ثابت جوزفسون = $2e/h$

KJ-90 = 483597.9 GHz/V

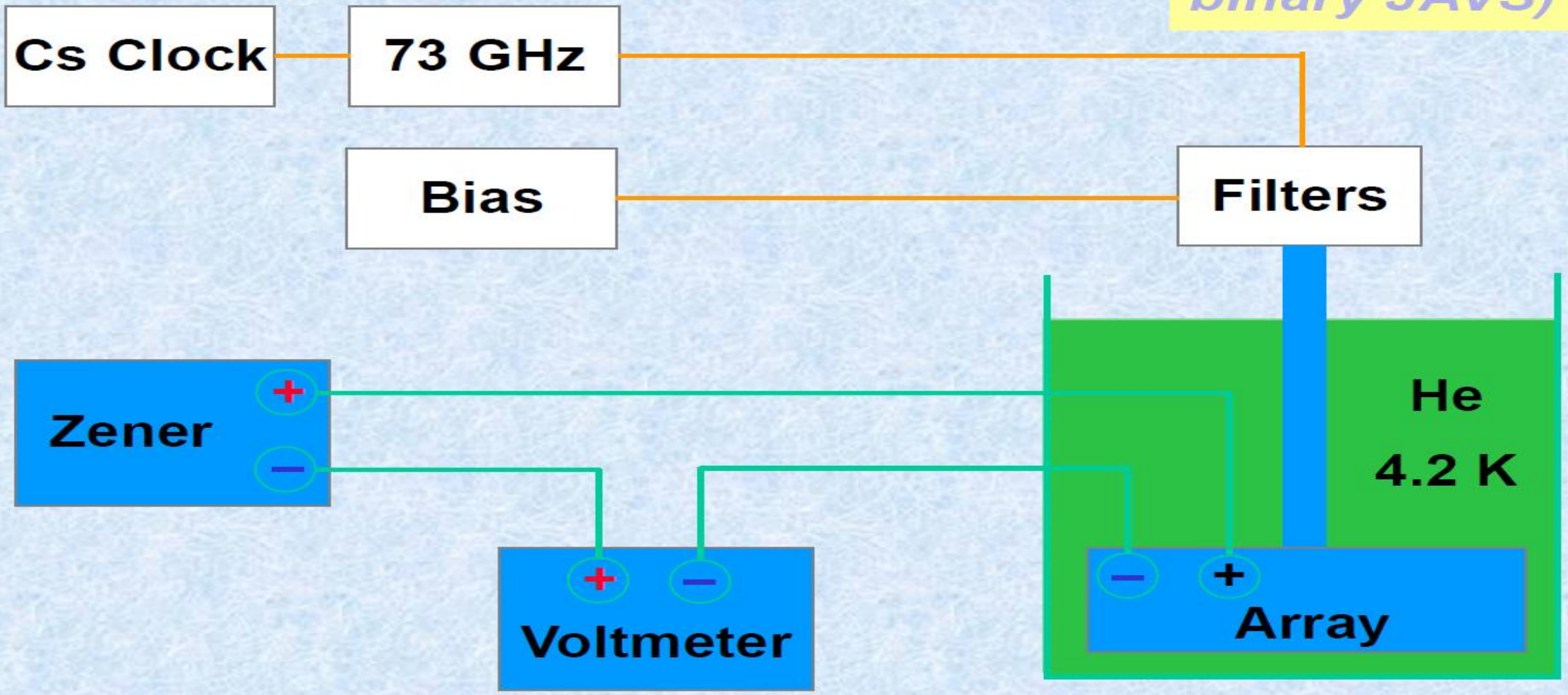
Steps are vertical, no thermal EMF's in the JJ, no IR drops within the JJ.

- Independent of JJ size, construction, temperature …
- Many steps; V_n=150 uV @ 75 GHz, adjustable to the same resolution as the frequency, f.

آرایه جوزفسون در برابر تغییرات در حدود 10^{-17} مستقل است.

The NRC JAVS Schematic

0 – 10 V
Zeners, DMMs
(Also acJAVS, binary JAVS)



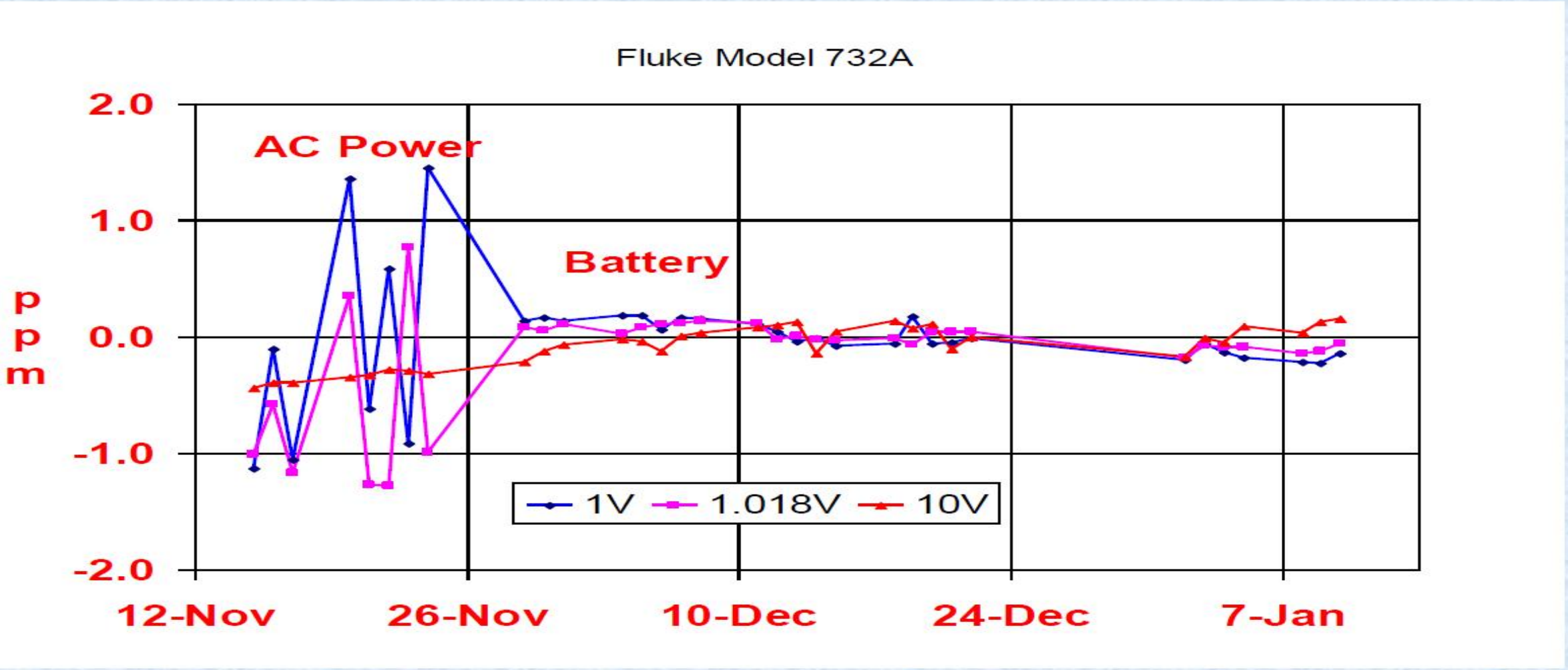
استاندارد های ثانویه ولتاژ

سلولهای استاندارد قبلاً استانداردهای اولیه بودند اما بتدریج از رده خارج شدند.

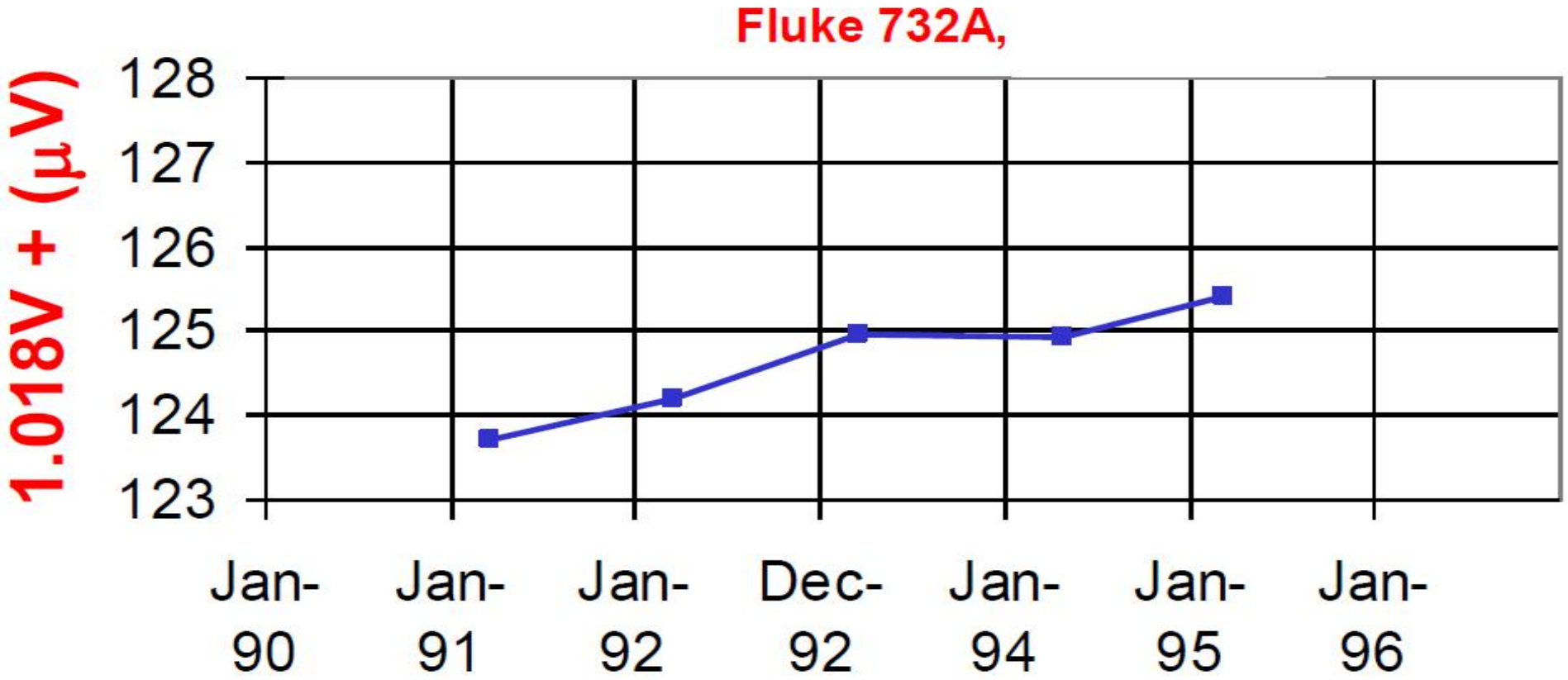
اکنون زنرها متداول ترین استاندارد ولتاژ هستند.

امروزه صنعت به طور فزاینده ای از کالیبراتورها و DVM ها با زنرهای داخلی برای مرجع اولیه ولتاژ DC استفاده می کند.

پایداری زنر – تغذیه متناوب یا باطری



پایداری زنر – تغییرات در زمان



جمع بندی ولتاژ DC

-استاندارد های اولیه آرایه جوزفسون ۱۰ ولت ($0.001 * 10^{-6}$)

-استاندارد های ثانویه سلول های استاندارد، زنر ها(فلوک B732، ولت متر های دیجیتال و کالیبراتورها) 1 mV to 1000 V (1-0.02 ppm)

-دتکتور ها EM Amplifiers, HP3458A, Keithley NanoVoltmeters

-مقیاس گذاری آرایه ۱۰ ولت، مقسم های ولتاژ مقاومتی، تکنیک bootstrap برای مقیاس گذاری ولتاژ های تا یک مگا ولت امکان پذیر است.

مقاومت

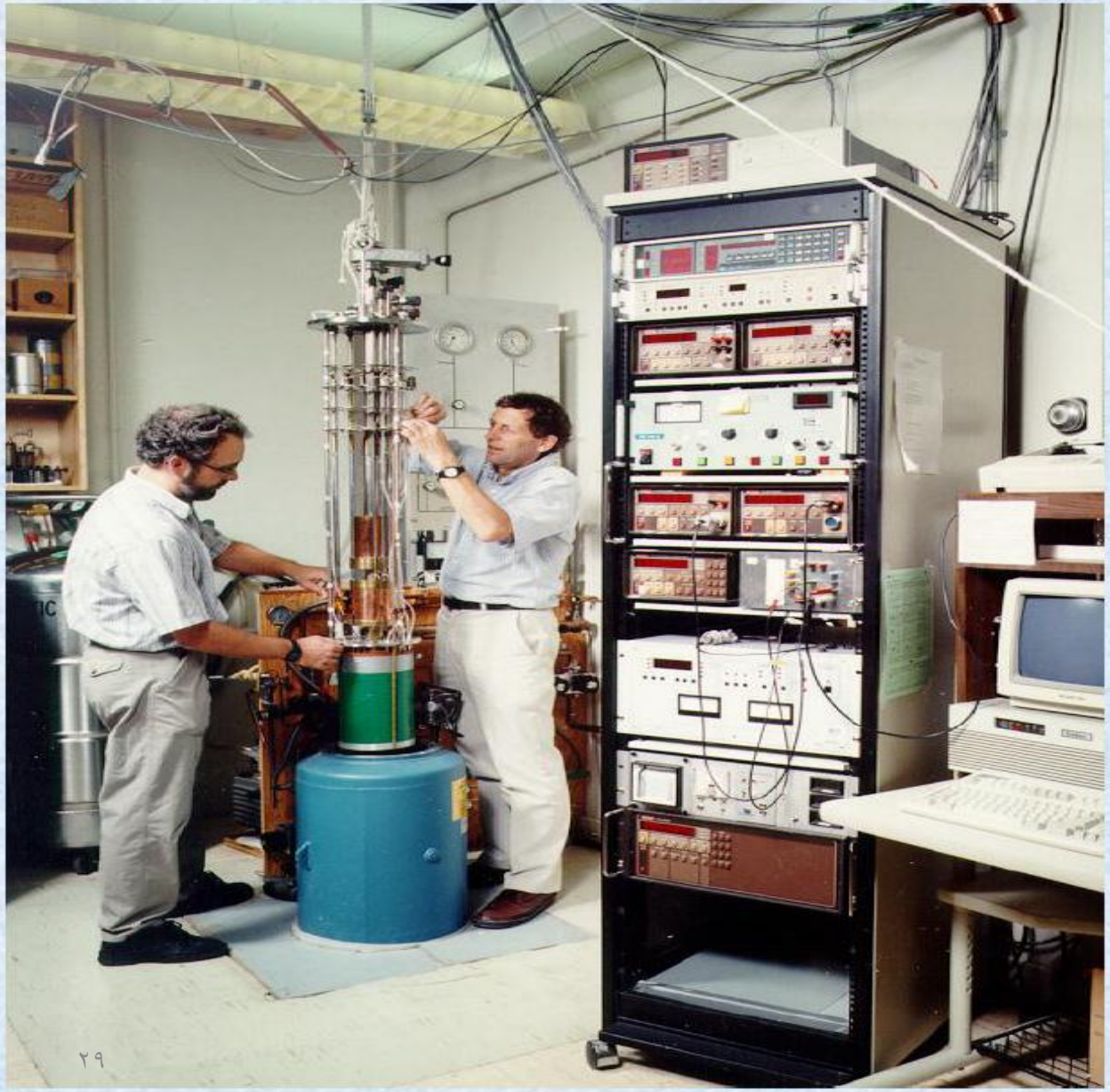
مقاومت

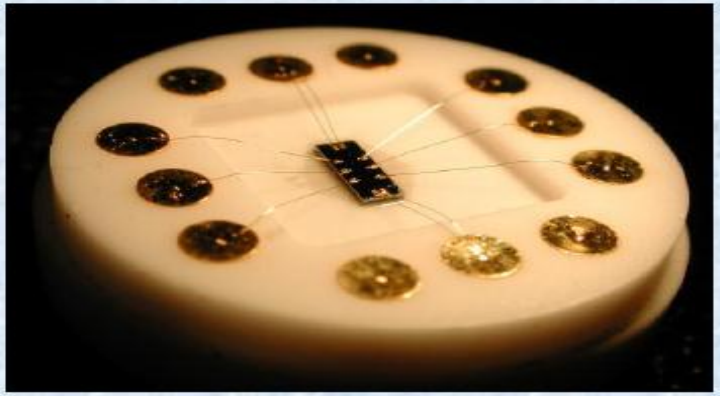
- راحتی در تشخیص 10 μΩ to 10 PΩ
  مقادیر بسیار بزرگ (10^{22})

Teflon	$10^{13} - 10^{18}$ Ωcm	
Sapphire, Quartz	$10^{15} - 10^{18}$ Ωcm	
Cu	$1.67\ 10^{-6}$ Ω cm	0.0068 /°C
Pb	$20.6\ 10^{-6}$ Ω cm	0.0034 /°C
Evanohm	134 Ωcm	0.00001 /°C

از پدیده مقاومت جهت ساخت سنسور های دما، فشار، نیرو، کشش، شدت نور و ... استفاده می شود.

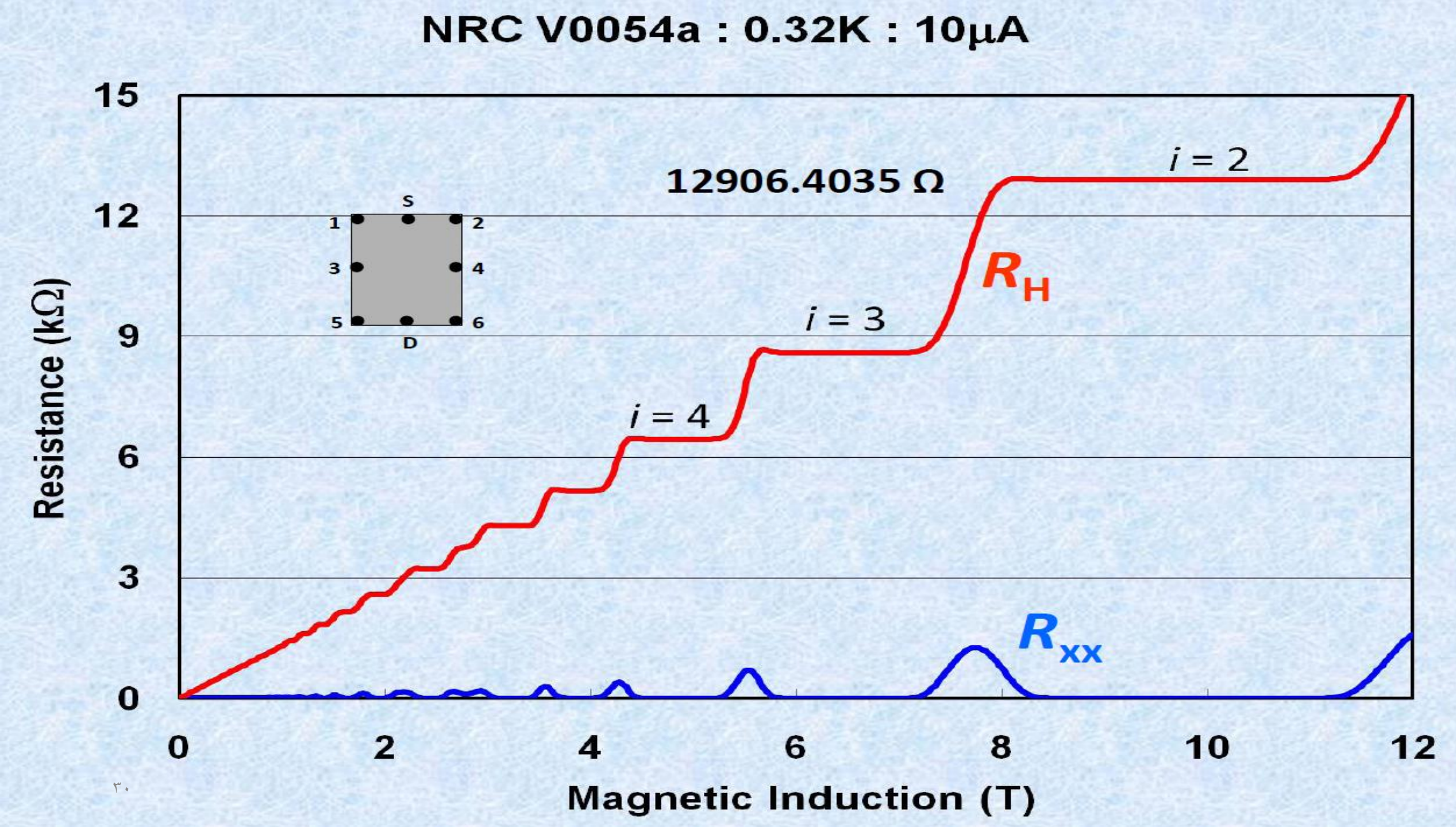
مقاومت کوانتوم هال



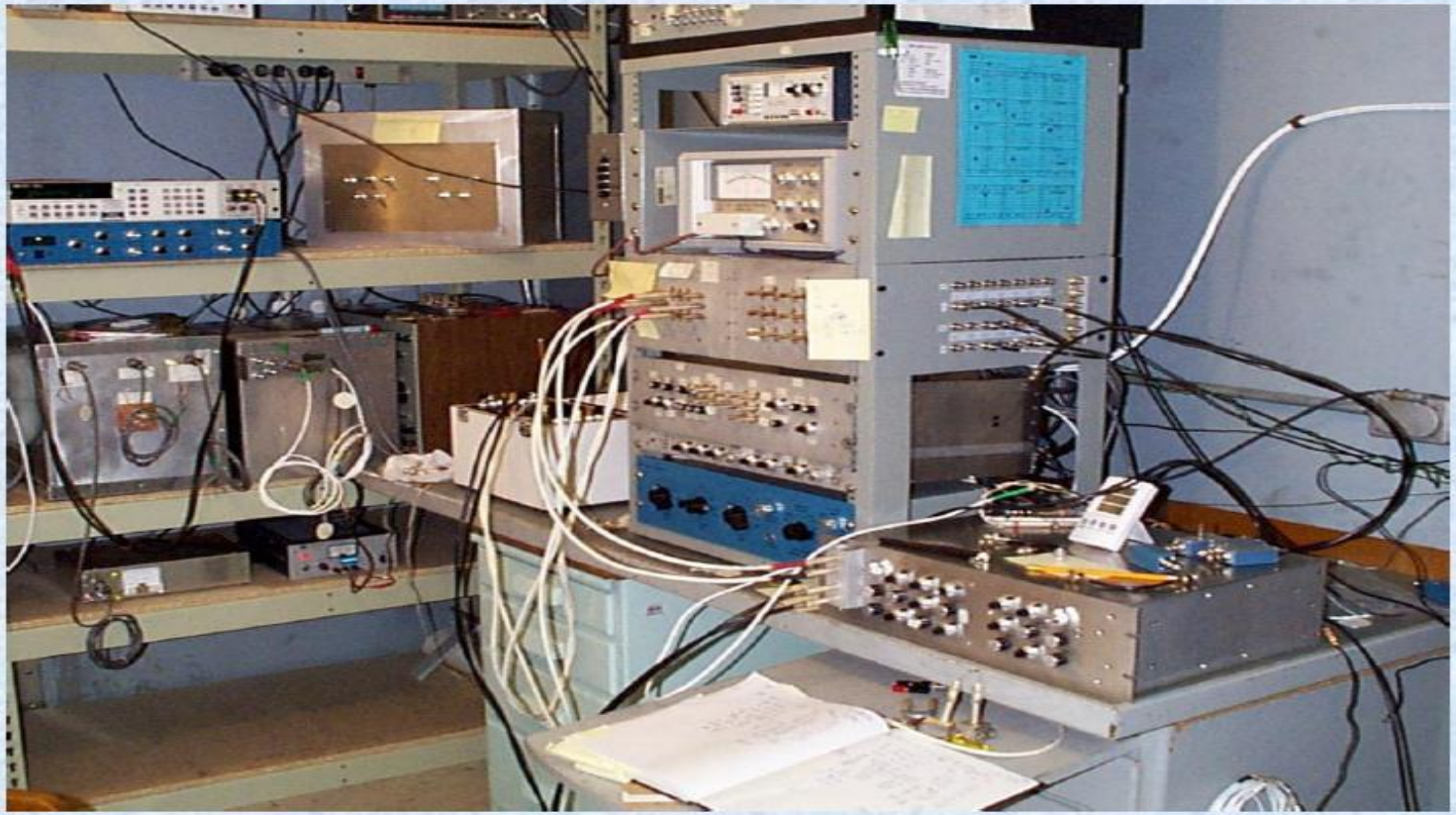


نمونه اولیه

- GaAs/AlGaA heterostructure
- (also Si Mosfet, II-IV structures, graphene)
- 14T magnet
- Pumped helium cryostat
- CCC Bridge, JAVS potentiometer…


NRC V0054a : 0.32K : 10μA
15
12
9
6
3
0
Resistance (kΩ)
0
2
4
6
8
10
12
Magnetic Induction (T)
12906.4035 Ω
i = 2
i = 3
i = 4
R_H
R_xx
S
D
1
2
3
4
5
6

پل مقاومتی CCC



در بسیاری از NMI ها پل مقاومت CCC پل اصلی نسبت dc است برای QHR در گستره ۰.۱ اهم تا یک مگا اهم قابل استفاده است.

-اثرات نشت پل فوق العاده کم است.

-پل مقاومت مقایسه کننده اولیه در استپ های ۲، ۳، ۴ و ۶ و با نسبت های ۱:۱، ۱۰:۱، ۱۰۰:۱ QHR را اندازه گیری می کند.

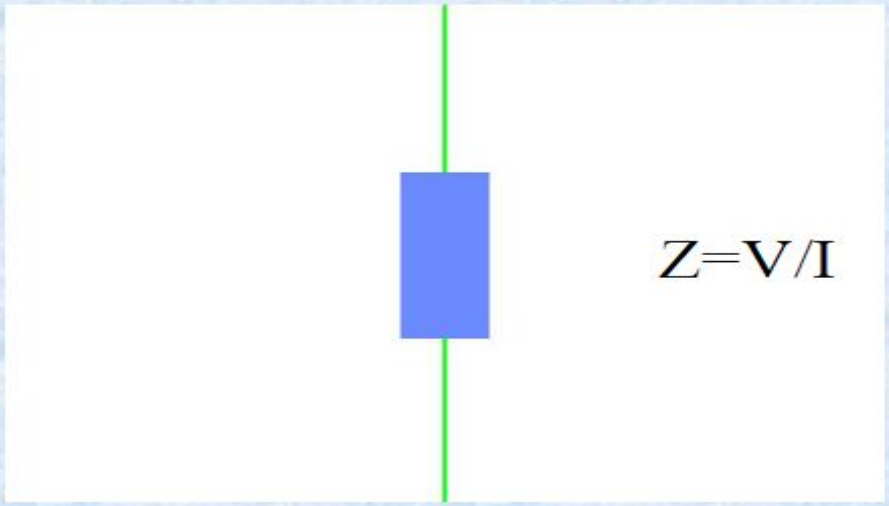
استاندارد ثانویه مقاومت

Coil or thin film
2 or 4 terminal
Oil: 25 C, air 23C, or .....

10 μΩ – 1 Ω
1 Ω – 100 kΩ
100 kΩ – 10 PΩ

امپدانس ۲ ترمینال

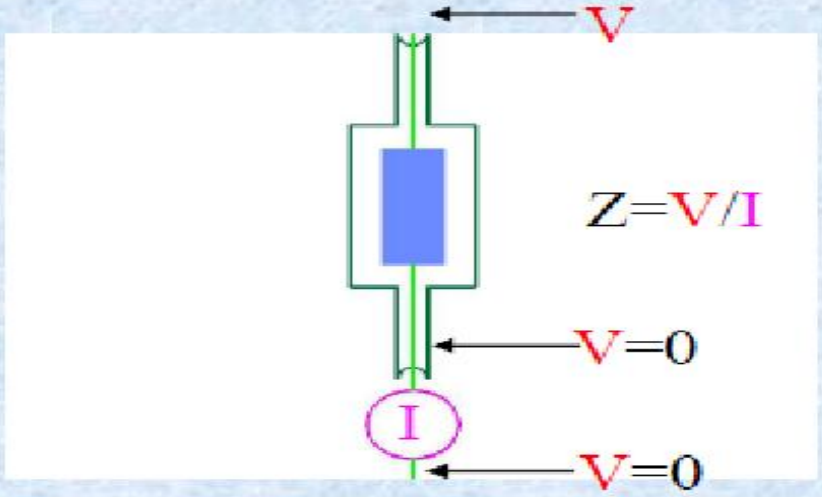
2



نحوه انتخاب مواد تأثیر خارجی بر عنصر را تعیین می کند: دما ، فشار ، رطوبت.

پارامترهای خارجی ، به طور خاص الکتریکی نیز می توانند تأثیر قابل توجهی در بهبود اندازه گیری دقیق و قابل تکرار امپدانس داشته باشند.

امپدانس ۳ ترمینال

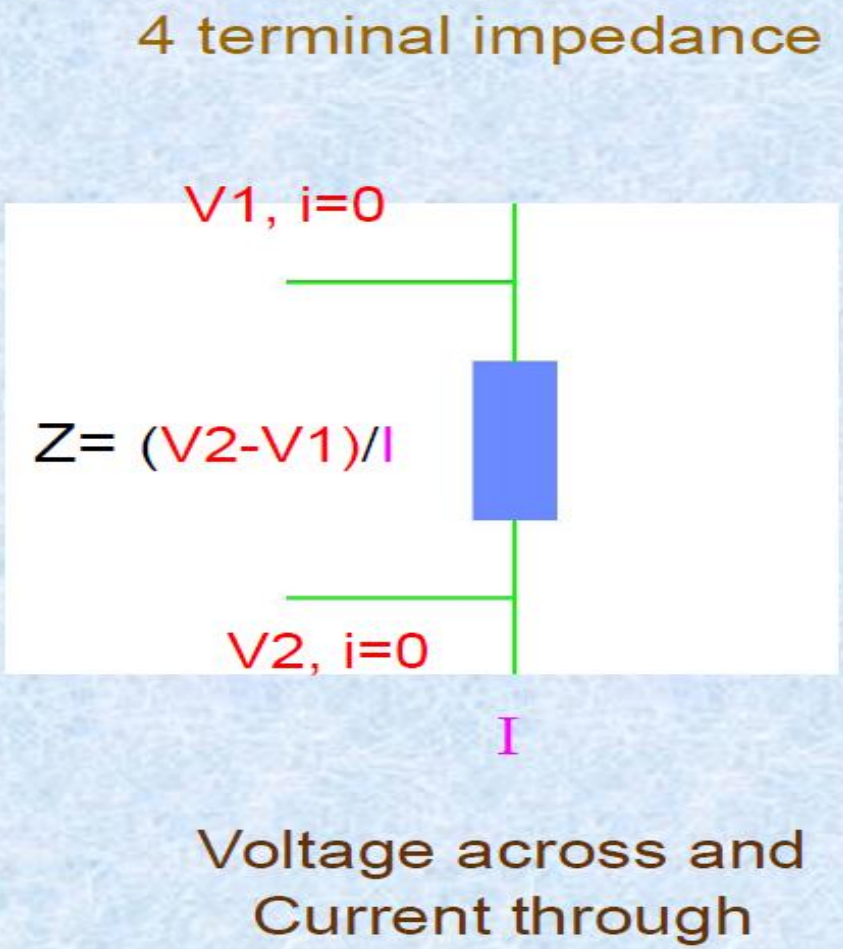


امپدانس های با مقدار بالا به جریان هایی که در محیط یا تجهیزات هستند بسیار حساس می باشد.

یک شیلد الکترواستاتیک رسانا که دور امپدانس را می گیرد و از طریق یک امپدانس کم به یک پتانسیل ثابت (ترجیحاً ۰) متصل می شود ، هرگونه جریان خارجی را از بین می برد و جریان های نشت داخلی را تثبیت می کند

در این امپدانس "۳ ترمینال" جریان اضافی و کم از طریق مسیر دارای پتانسیل کم (زمین) به بیرون از مدار هدایت می شود. این حالت برای اکثر اندازه گیری های ظرفیت و مقاومت بالا استفاده می شود.

امپدانس۴ ترمینال

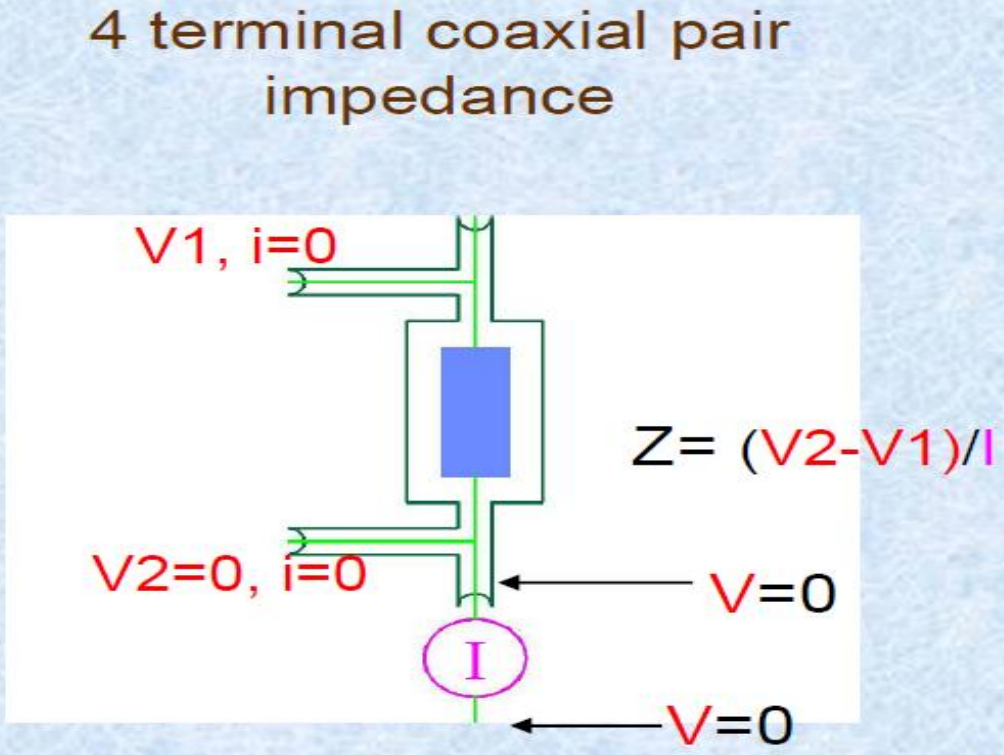


امپدانس های پایین متحمل پتانسیل های نا چیز می شوند مخصوصا اگر جریان در امتداد لیدهایی که ولتاژ را اندازه گیری می کنند جریان داشته باشد.

اندازه گیری ولتاژ به وسیله لید هایی انجام می شود که هیچ جریانی در آن جاری نمی شود .

این یک امپدانس '۴ ترمینال' است و معمولاً برای مقاومتهای کمتر از ۱۰۰ کیلو اهم استفاده می شود.

امپدانس ۴ ترمینال: ملاحظات الکترواستاتیک

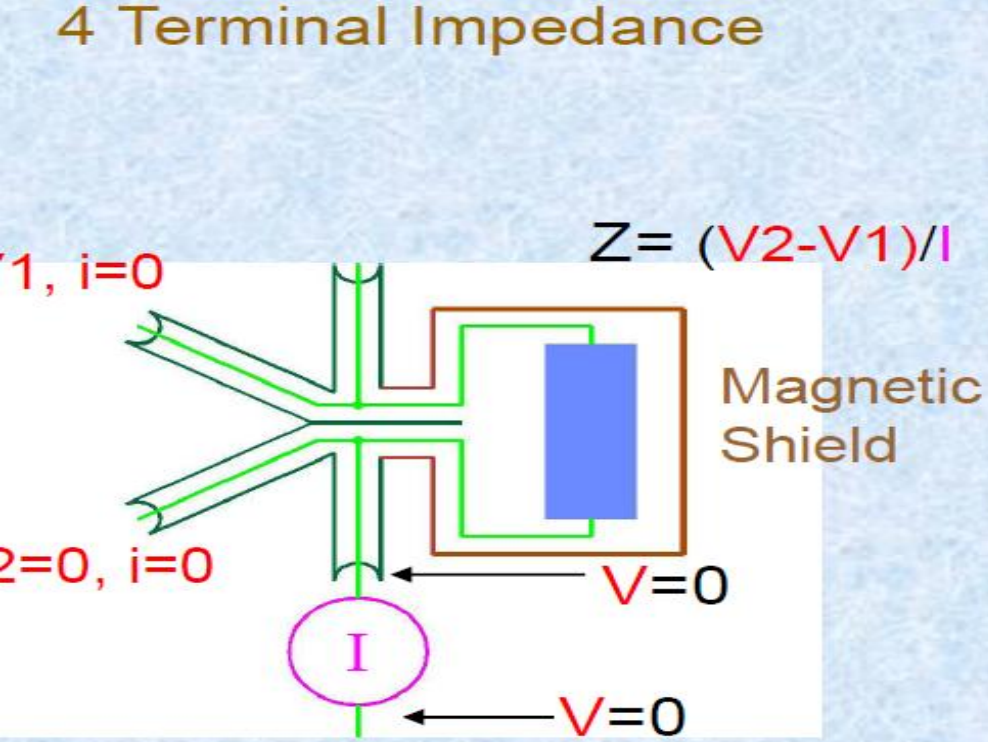


دو حالت آخر را با هم ترکیب می کند

- اختلاف پتانسیل را بهبود می دهد
- محافظ شیلد الکترواستاتیک
- نشت های داخلی ثابت به شیلد متصل می شوند

امپدانس ۴ پورت برای مقاومت های کمتر از ۱۰۰ کیلو اهم و ظرفیت بیشتر از pF۱۰۰ که در آن بیشترین دقت و وابستگی به فرکانس مهم است استفاده می شود.

امپدانس ۴ ترمینال: ملاحظات مغناطیسی



برای رسیدن به بالاترین دقت و فرکانس (بیشتر از ۱۰۰ کیلوهرتز)، نشت های مغناطیسی را نیز می بایست کنترل کرد.

کابل های کواکسیال با جریان برابر و مخالف در هادی های داخلی و خارجی باعث ناپایداری مغناطیسی می شوند.

در هر جایی که ویژگی های کواکسیال از بین برود می بایست از شیلد های مغناطیسی استفاده نمود.

جریان متعامد و نحوه قرارگیری لید نیز باعث ناپایداری مغناطیسی می شوند.

OVERLOAD
OVERLOAD
Power Source
NOM

استاندارد های ثانویه مقاومت

2 terminal
air bath
EMI issues
Voltage coefficient
leakage

4 terminal
oil bath
Joule heating
connection
sensitive

100 TΩ

100 GΩ

1 GΩ

100 MΩ

1 MΩ

100 kΩ

10 kΩ

QHR

1 Ω

0.1mΩ

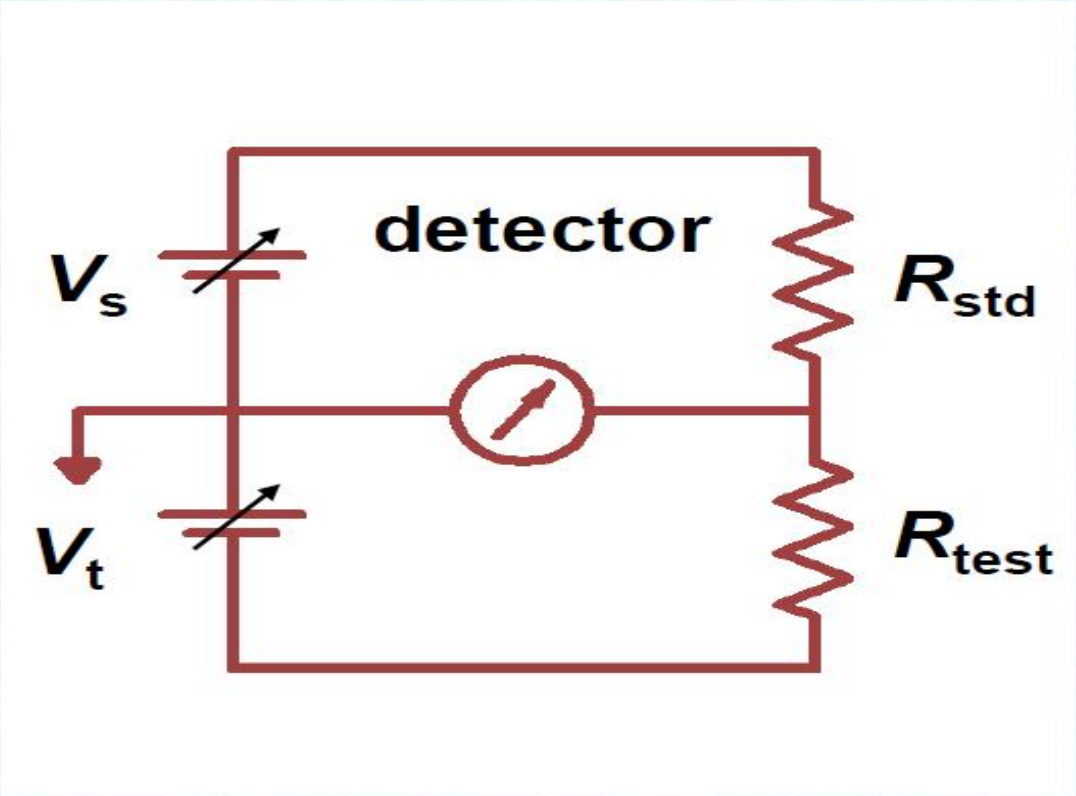
teraohmmeter

dual-source
bridge

automated
wheatstone
bridge

dc current
comparator
+
range
extender

پل مقاومتی

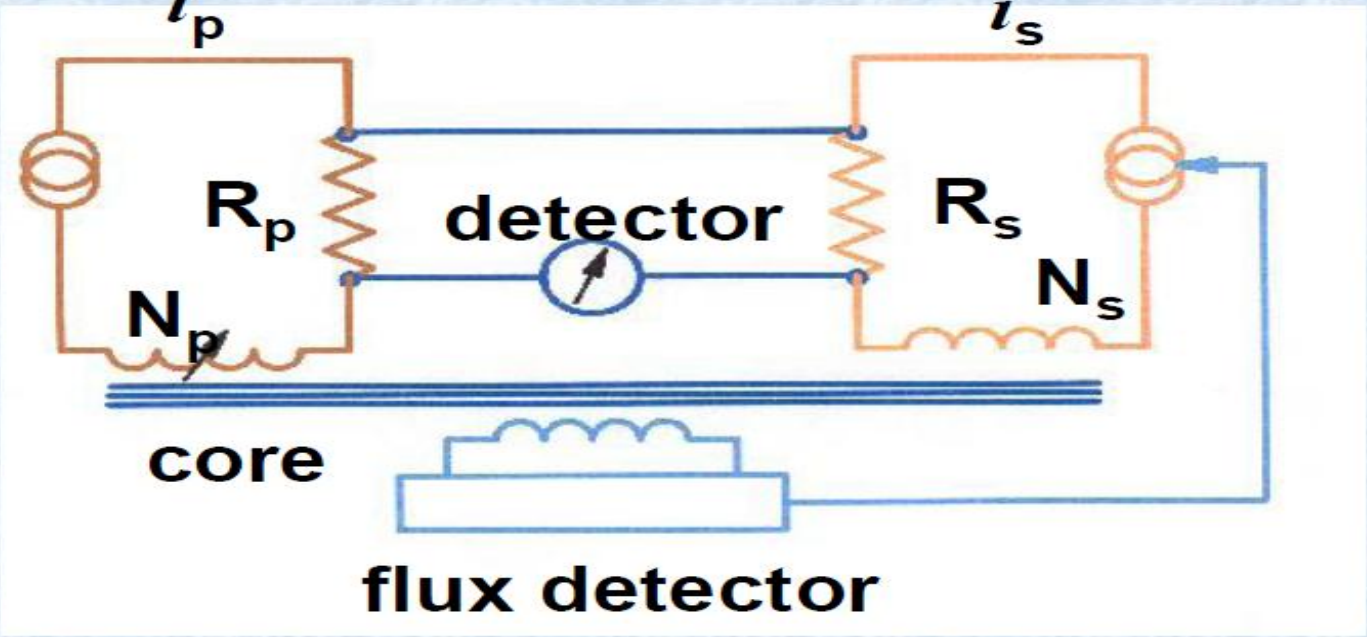


برای شناسایی دقیق، مقاومت های مجهول با مقاومت های معلوم مقایسه می شوند.

اساس کار آن به تعادل رساندن دو طرف مدار با استفاده از تغییرات ولتاژ می باشد.

مقایسه کننده جریان مستقیم

ولتاژ برابر و جریان نسبی



پل مقاومتی ۴ ترمینال

خطی بودن آن بستگی به تعداد دور سیم پیچی دارد.

گستره یک اهم تا ۱۰ کیلو اهم
امکان گسترش گستره برای جریان های بالا (کمتر از ۱۰ میکرو اهم)

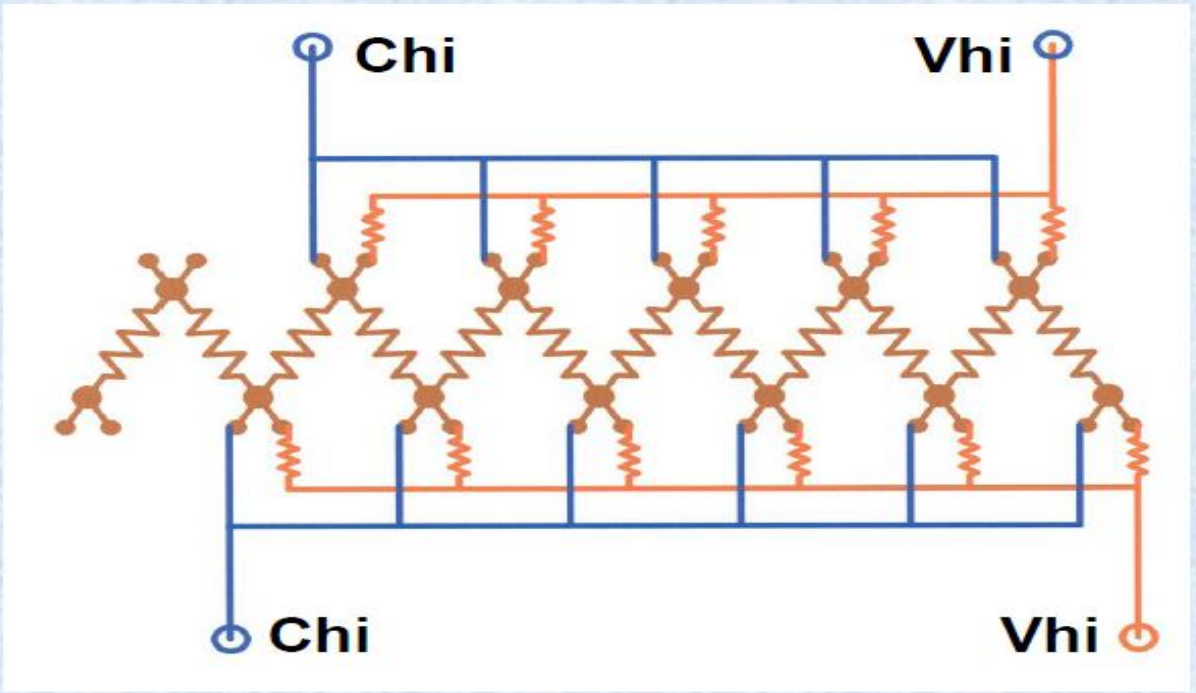
پل های تجاری موجود و به طور گسترده ای در NMI ها و صنایع مورد استفاده قرار می گیرند.

مقاومت هامون – پیکربندی های سری و موازی

پل مقاومتی ۴ ترمینال

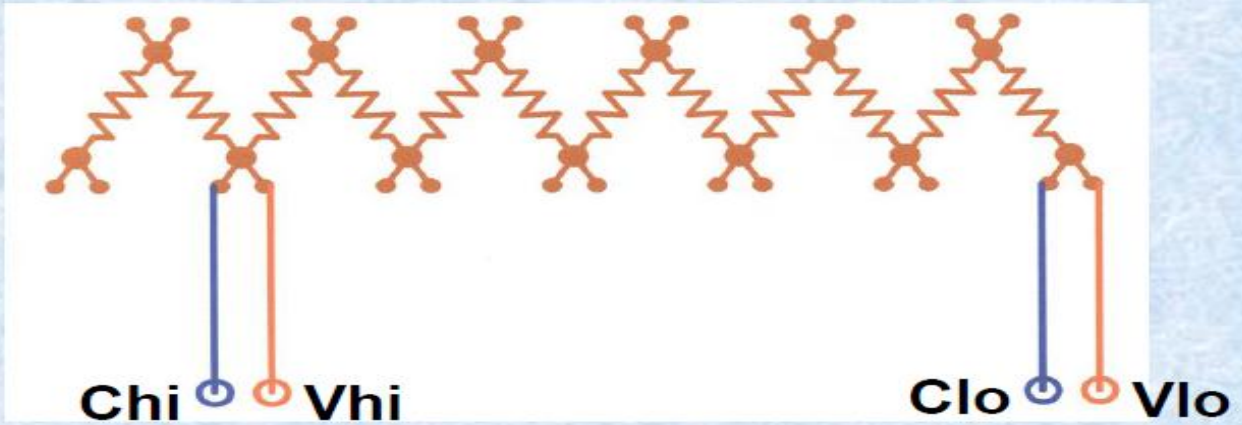
موازی

$$\text{مقاومت کل} = \frac{R}{n} + \Sigma\delta\frac{R}{n}$$



سری

$$\text{مقاومت کل} = nR + \Sigma\delta R$$



$$\text{Ratio of Series/Parallel} = n^2 \quad \delta^2$$

مقاومت هامون – کاربرد

Fluke 752A
Reference
Divider

از گستره ۱ اهم تا ۱ گیگا اهم موجود می باشد

تا ولتاژ های بالاتر از یک کیلو ولت

نسبت مقاومت ۱۰:۱ و ۱۰۰:۱

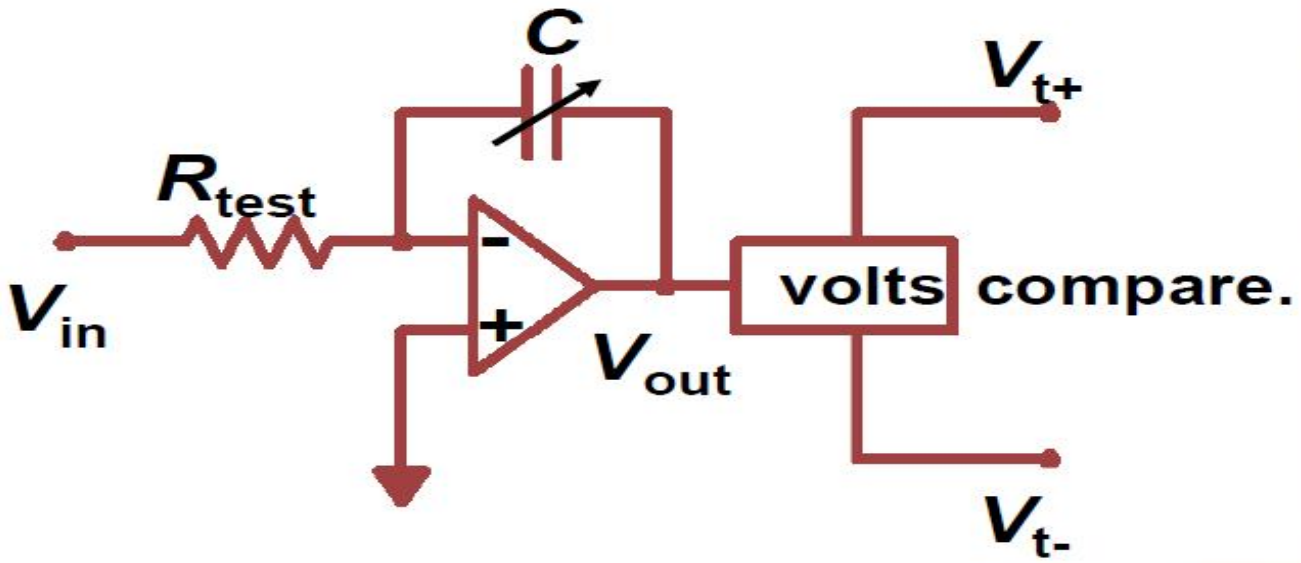
مقاومت های بالا به عنوان استاندارد های نسبت
(در جعبه های جدید مقاومت ccc جایگزین شده است)

تعیین ضریب قدرت

توان هر المان مقاومت هامون ثابت نگه داشته می شود و با یک پل مستقل جریان ۱۰:۱ ضریب توان محاسبه می شود.

ترا اهم متر

یک روش شارژ خازنی به هنگام

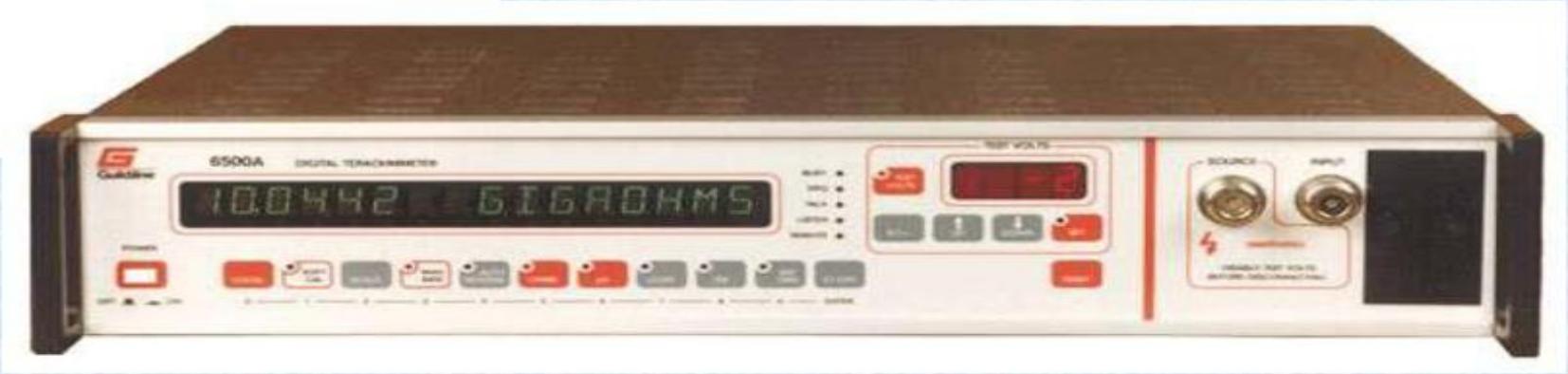


$$100\ G\Omega \longrightarrow 10\ P\Omega$$

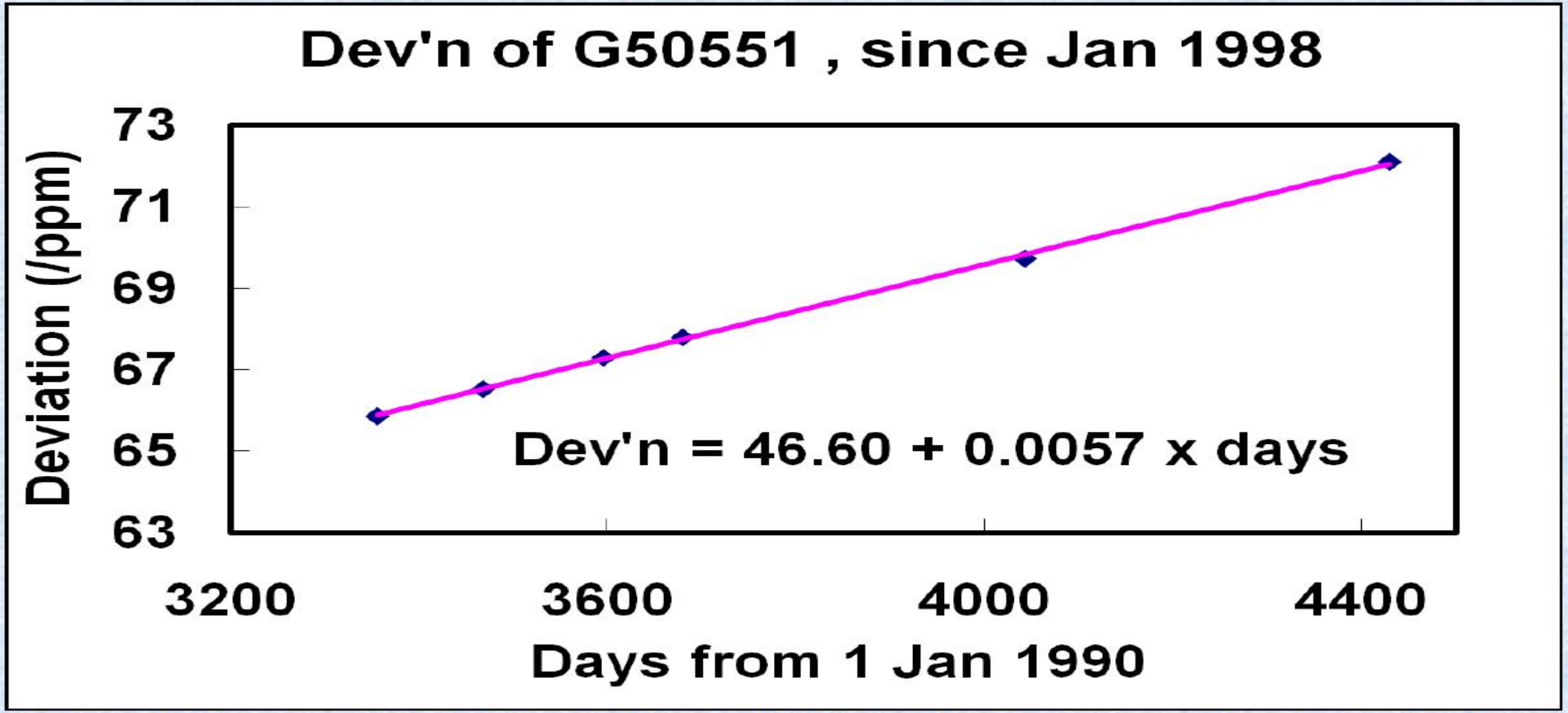
$$R_{test} = \frac{V_{in}\,\Delta t}{C\Delta V_t}$$

$V_t = 0.1,\ 1.0$ or 10 V

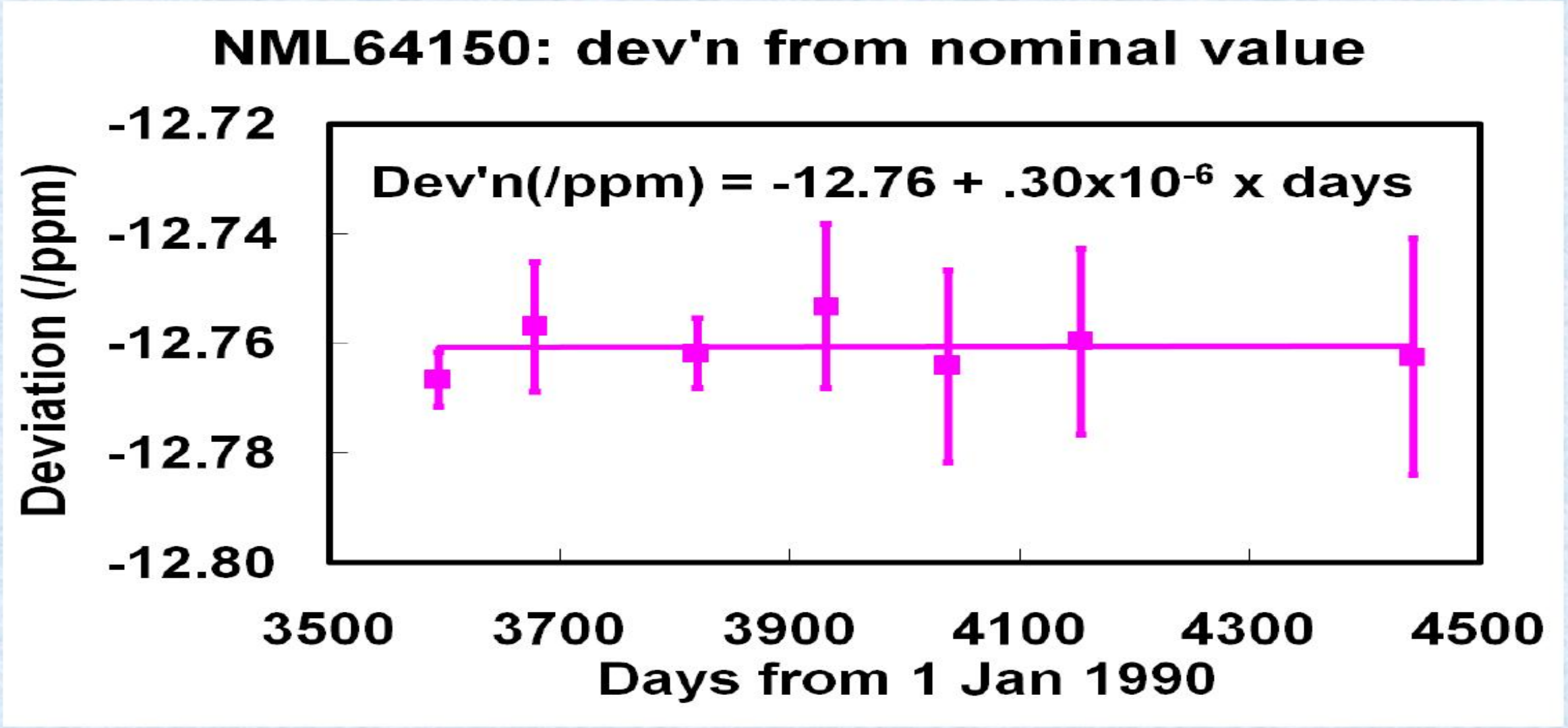
C = 27, 270, 2700 pF



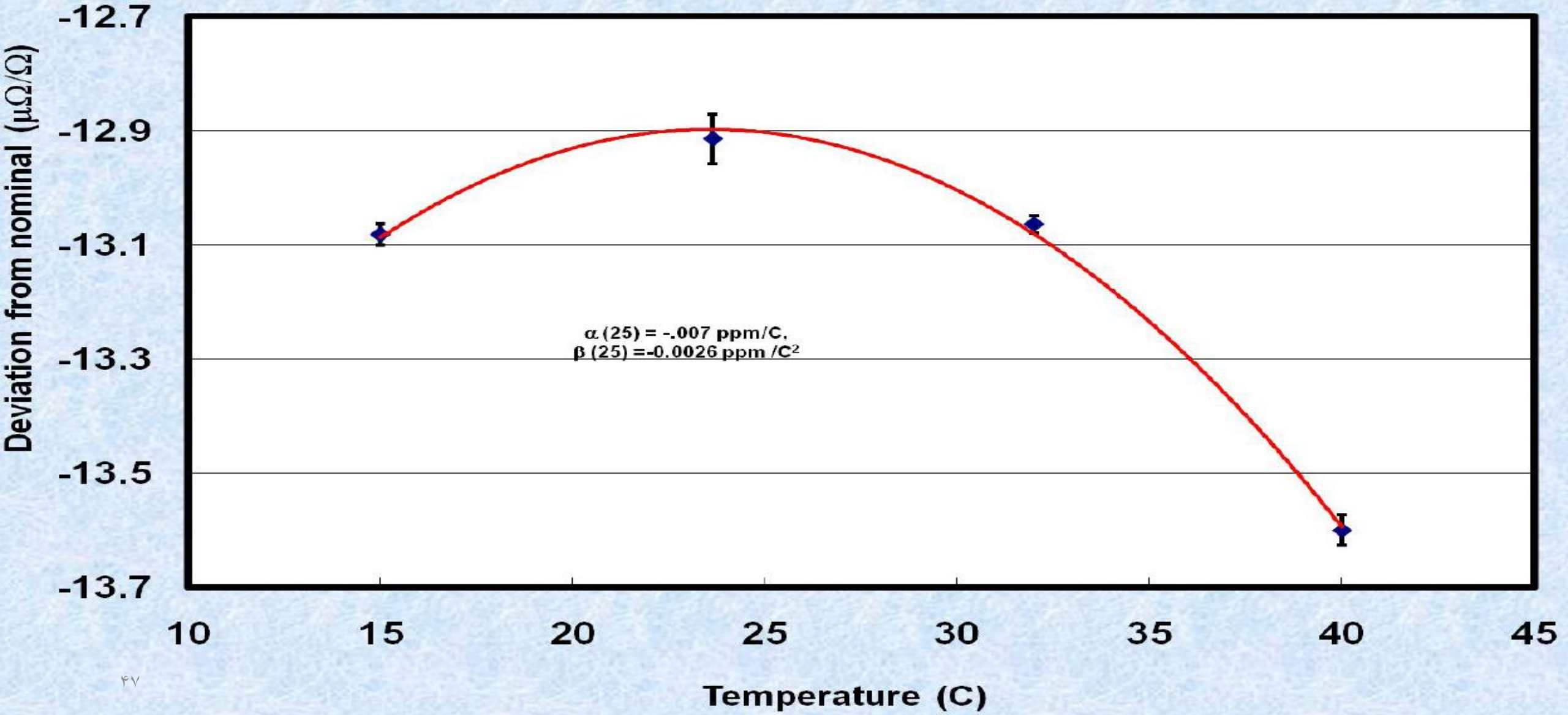
تغییرات مقاومت در زمان



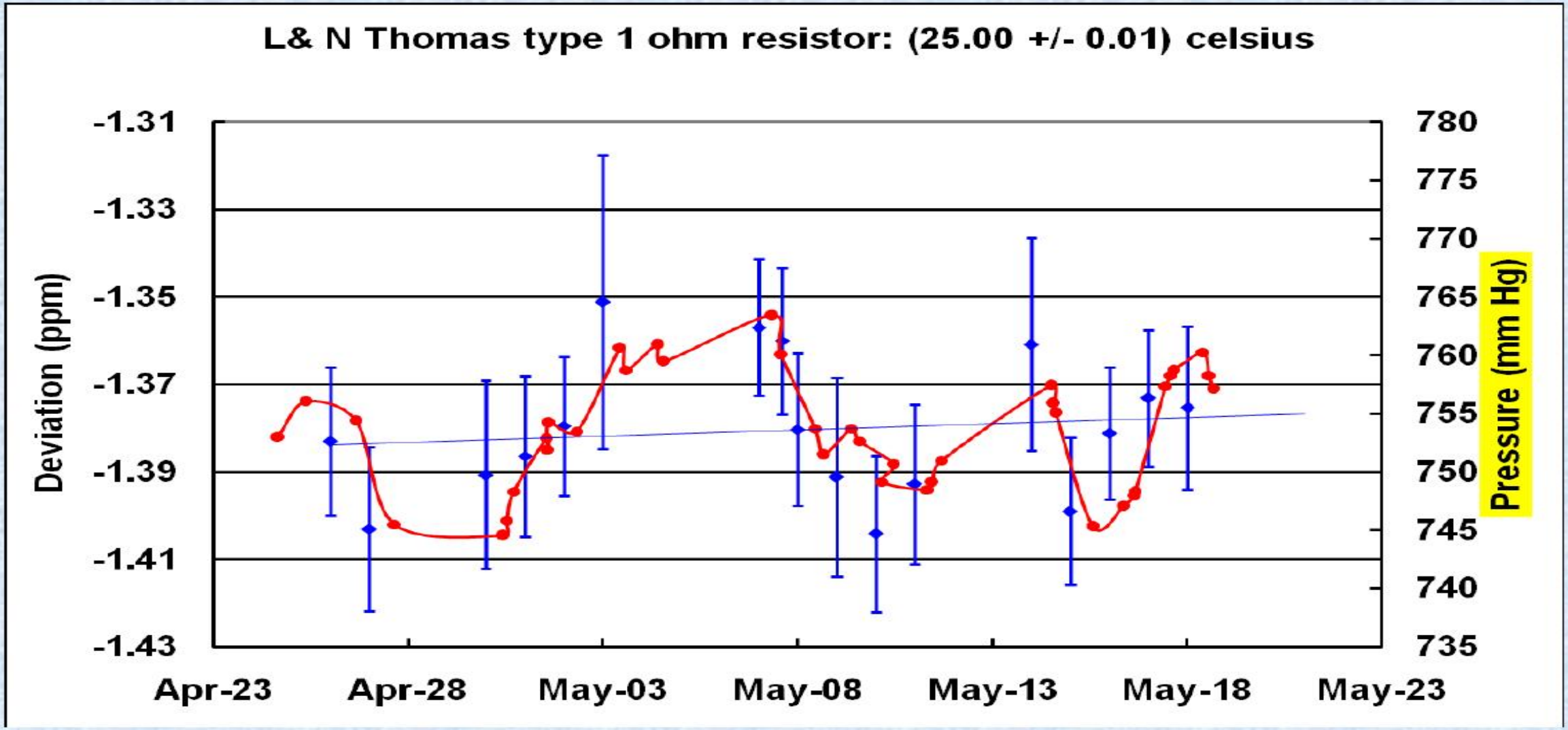
تغییرات مقاومت در زمان



تغییرات دما–مقاومت



تغییرات فشار – مقاومت



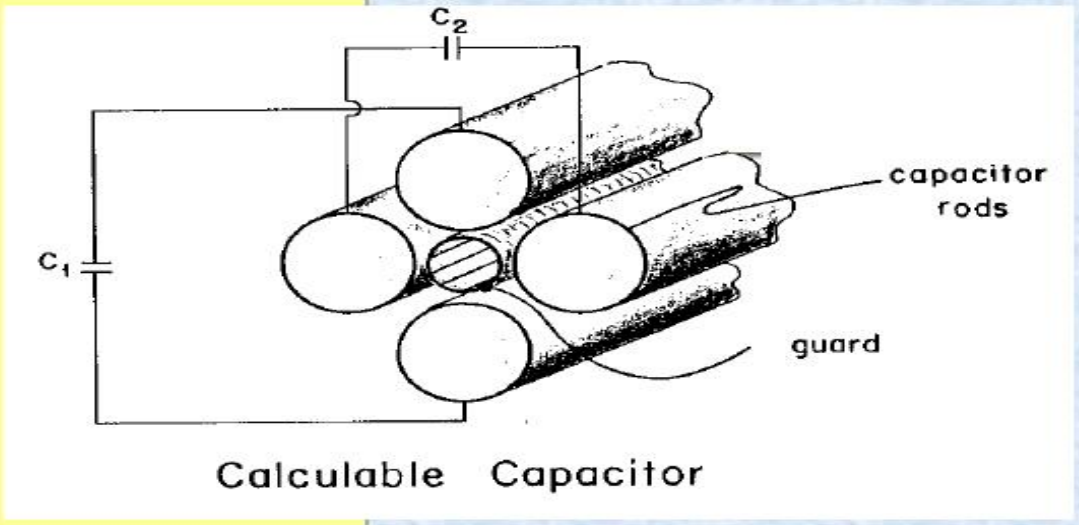
ظرفیت خازنی

ظرفیت خازنی

استاندارد اولیه – خازن قابل محاسبه

بصورت مستقیم از ۰.۰۰۲-۱ پیکو فاراد از اندازه گیری طولی

NML, NIST, LNE, BIPM (NIM, NRC)

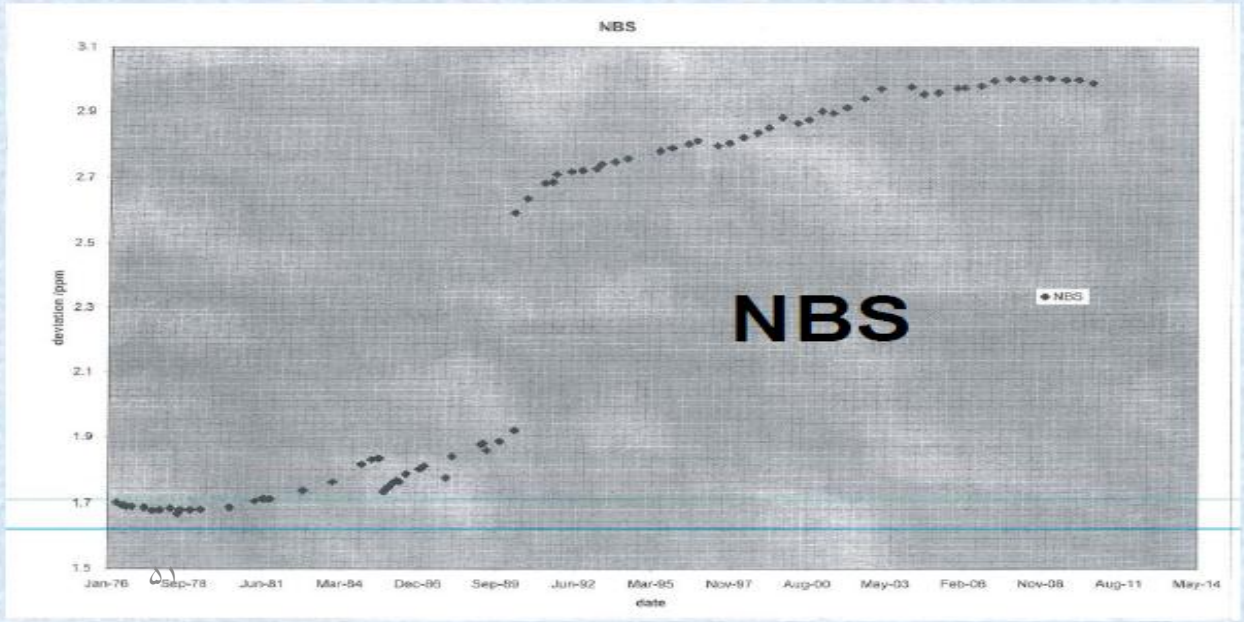


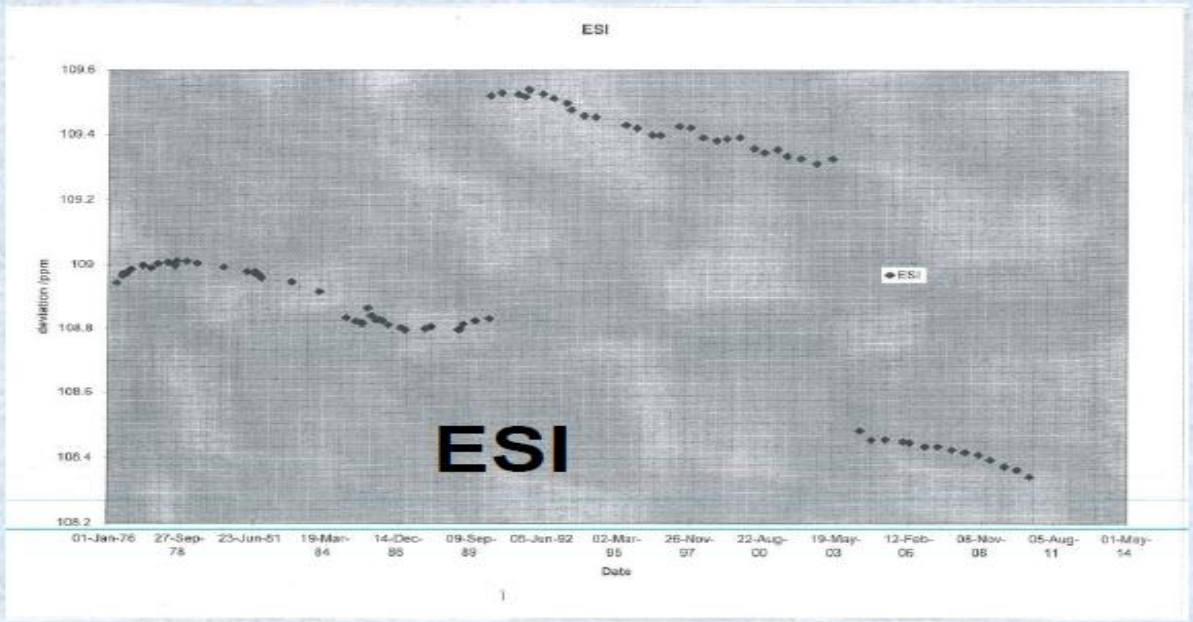
ثانویه در ۱۰ و ۱۰۰ پیکو فاراد

از سال ۱۹۹۰ تعیین از طریق QHR نیز انجام می پذیرد.

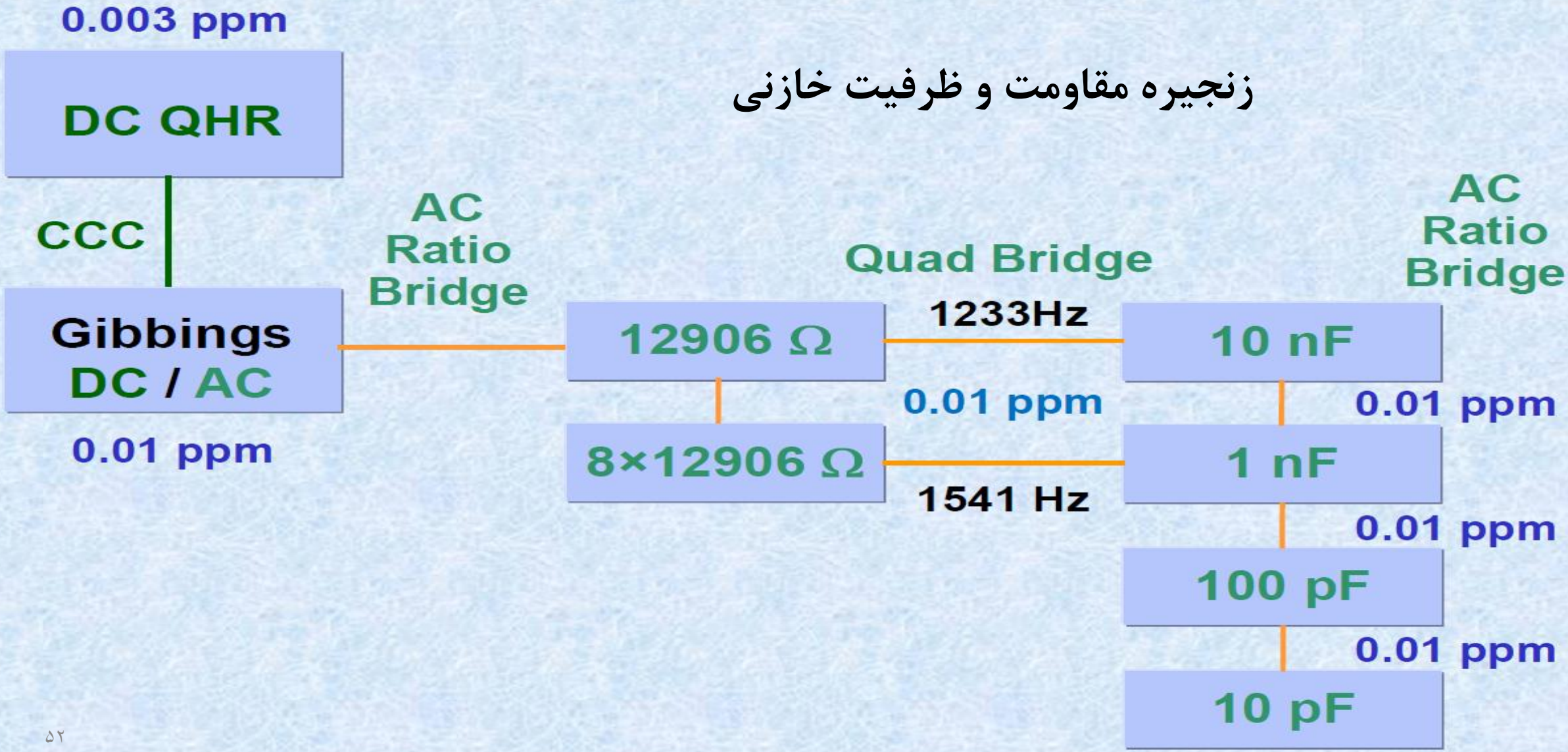
استانداردهای اولیه: پایداری با زمان و دما

3 x 10 pF
Controlled airbath
35 yrs drift:
GR 0.2 ppm
NBS 0.9 ppm
1990 step is SI change
ESI drop – 2003 power outage





قابلیت ردیابی ظرفیت خازنی از طریق QHR



تغییر پل DC به پل AC

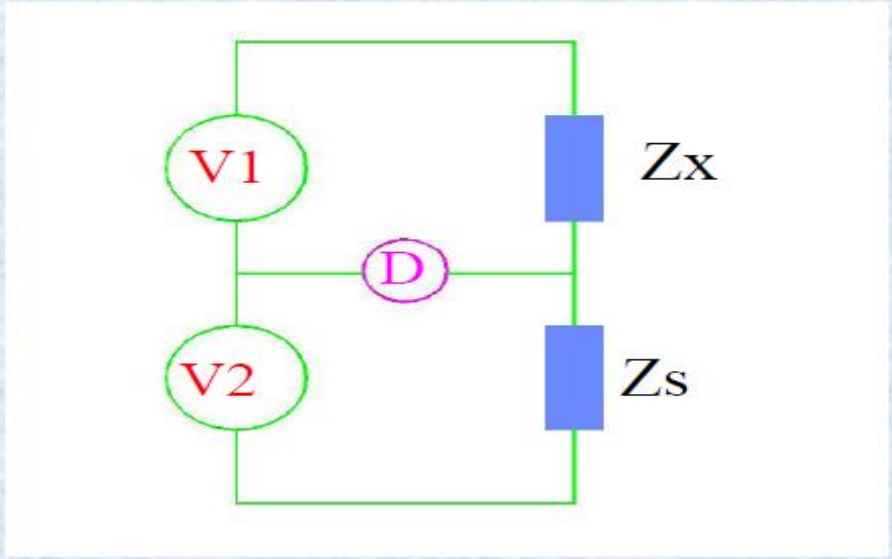
ترانسفورماتور ها و IVDها منابع ولتاژ

ترانسفورماتور های تزریق و تشخیص دتکتورهای جریان نول

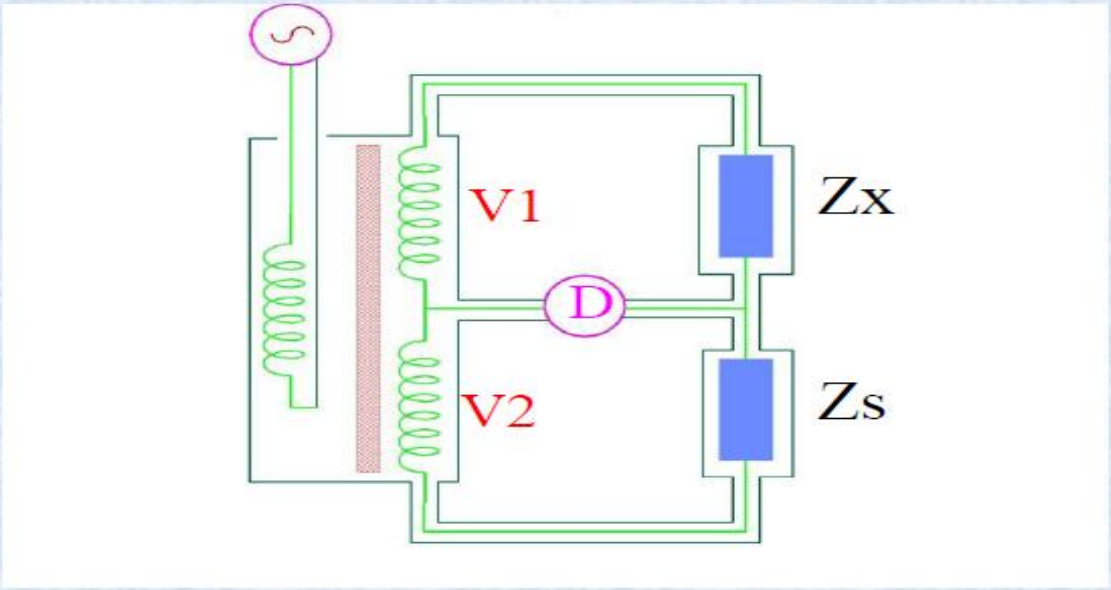
کابل های کواسیال گاهی با برابر کننده های جریان (چوک های کواکسیال) سیم های تک

تقویت کننده های قفل حساس به فاز دتکتورهای ولتاژ نول

پل نسبتی دو پورت DC



پل نسبتی دو پورت AC



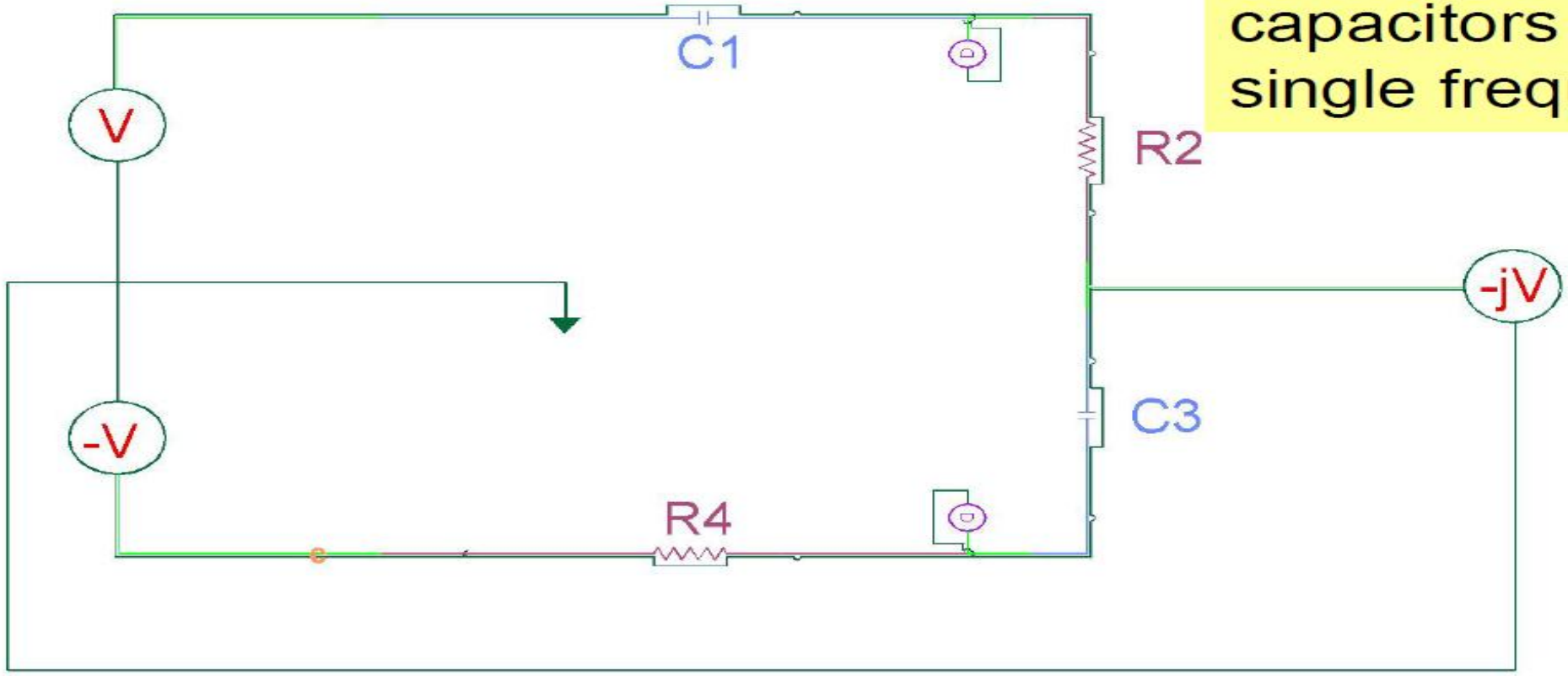
پل AC Quadrature

شماتیک ساده یک پل AC Quadrature

$\omega^2 C1\ R2\ C3\ R4 = 1$

V, -*V*, -j*V* bridge
2 null detectors

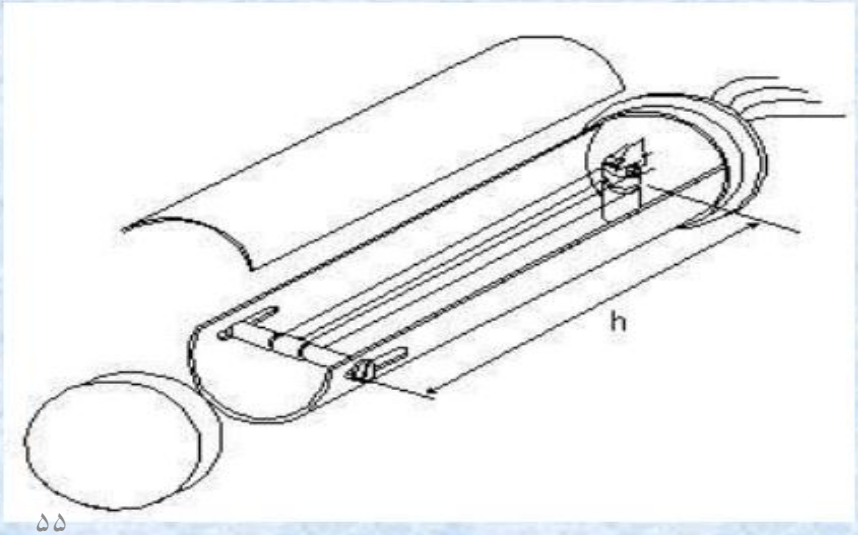
compares 2 resistors and 2 capacitors at a single frequency.

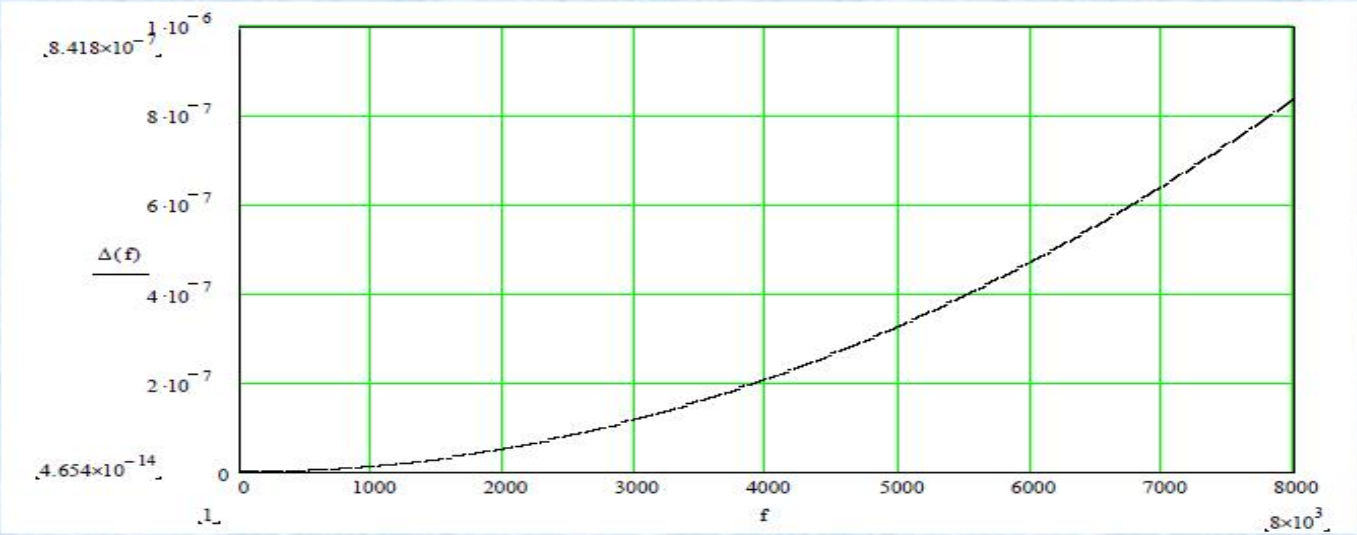


مقاومت های قابل محاسبه فرکانس

برای دو نوع مقاومت دقیق مدل وابستگی به فرکانس وجود دارد. نوع کواکسیال یا حداد و نوع کوادرفیلار معکوس یا Gibbings.

مقایسه طرحهای مختلف نشان می دهد که این مدلها و مقاومتهای آنها می توانند تا ۱۰ کیلوهرتز و برای مقاومتهای کمتر از ۲۰ کیلوگرم استفاده شوند. در ۱۵۹۲ هرتز در هر کیلوگرم دقت می تواند کمتر از ppm۰.۰۱ باشد.





پل های ظرفیت خازنی تجاری

Andeen Hagerling 2700A

50 Hz – 20 kHz, 5 ppm, 8 digits

QuadTech 7600 10Hz – 2MHz

0.05% accuracy, 7 digits

Agilent 4284A 20Hz – 1MHz

0.05% accuracy, 6 digits

استاندارد های ثانویه–ظرفیت خازنی

Fused Silica
oven to stabilise
1 kHz, 0.4 ppm
Drift 1×10^{-7} over 10 years

Decade values, air or mica (GR1409)
Thermally unstable
Air 1pF (15V) 3.2 ppm
1 µF (0.25 V) 100 ppm

تثبیت کننده خازنی

اندوکتانس

کالیبراسیون القا کنایی

با استفاده از پل ماکسول-وین می توان قابلیت ردیابی به SI را برقرار نمود (به وسیله خازن ها و مقاومت های قابل ردیابی)

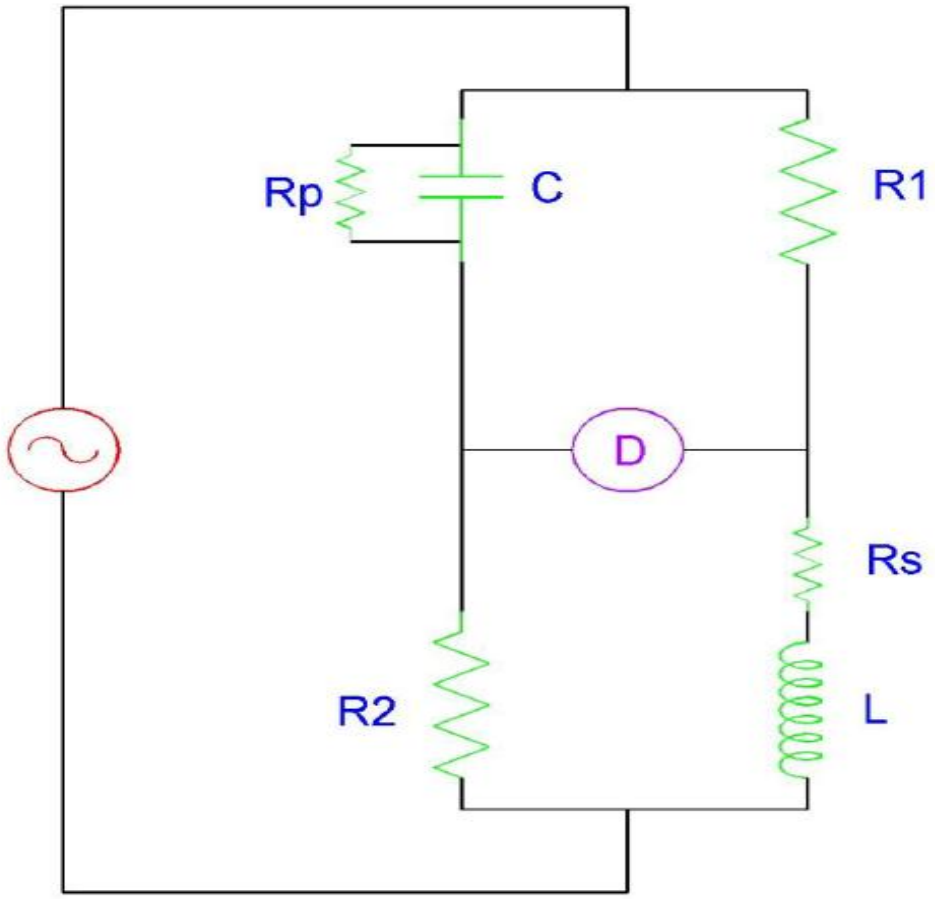
100 uH (ohms)
⟶ 10 H (kohms)
Measure resistance (HP3458A) – use with temperature dependance
Use LCR meter as transfer standard
Gives 100 ppm at 1 mHm
500 ppm at 10 H

1 mH 2 mH

50 µH

پل ماکسول وین – القا کنایی

مقدار و معادل مقاومت سری بوسیله سلف از دو مقاومت و خازن و فرکانس آن بدست می آید



$$\frac{Rp\,(Rs + j\omega L)}{1 + j\omega CRp} = R1R2$$

معمولاً به عنوان یک پل ۲ پورت کار می کند.

DC/AC **مبدل**

مبدل DC/AC

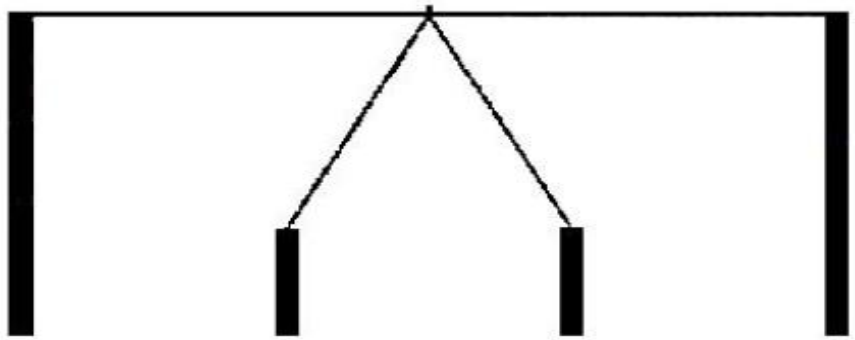
برابری مقادیر DC و AC زمانی حاصل می شود که آنها توان الکتریکی مشابهی تولید کنند که به نوبه خود باید معادل توان مکانیکی باشد. بنابراین دما یک شاخص خوب و بدون ابهام برای این برابری است.

این کاربرد دامنه محدود ولتاژ و فرکانس تا به امروزدارد و تعداد کمی از آنها هنوز در حال کار هستند ..

شماتیک ابتدایی مبدل ولتاژ حرارتی

ترموکوپل مستقر در مرکز محل تقویت
روی یک سیم بخاری مناسب

خلا

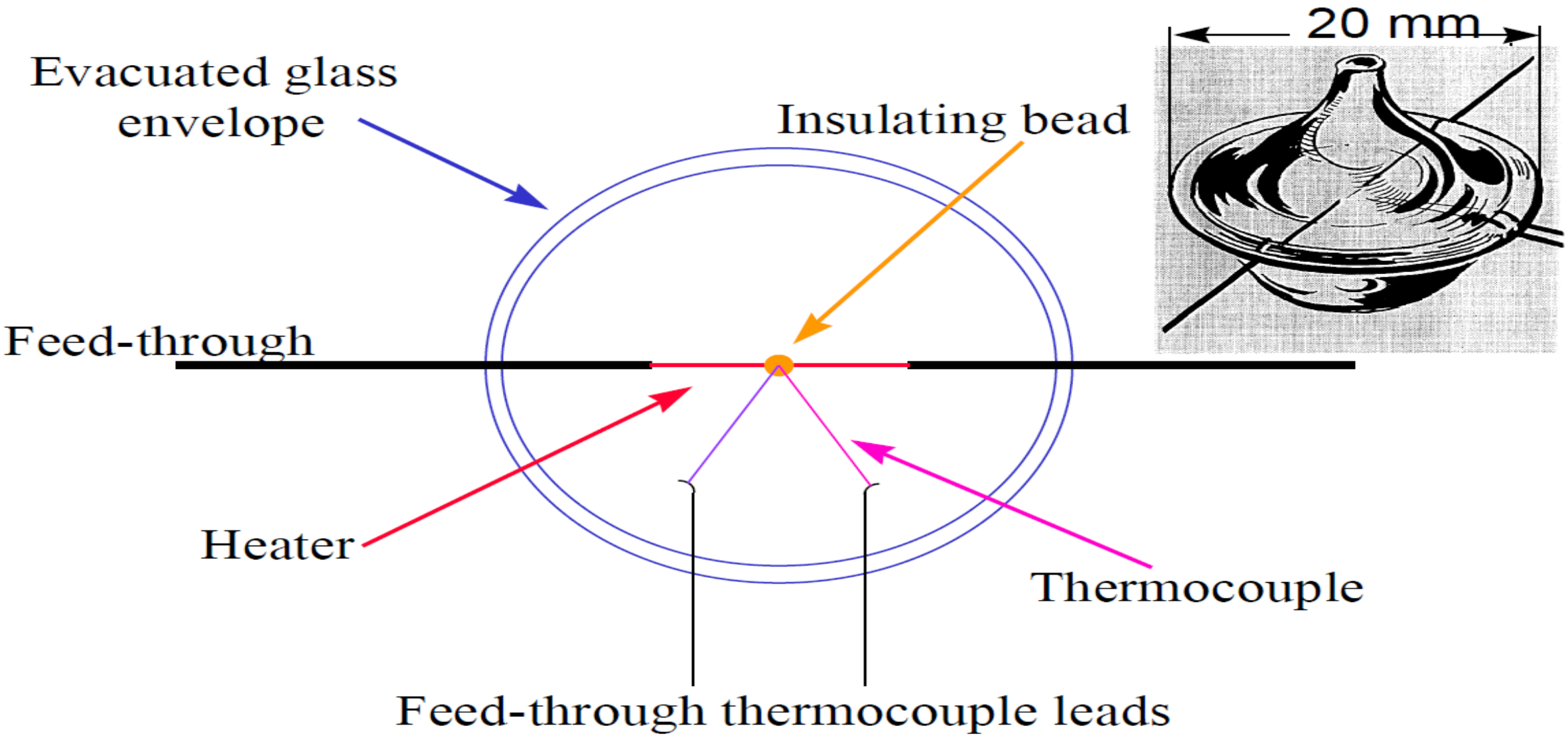


Support posts

Support lead

Thermocouple

مبدل حرارتی تک اتصال الگوی SJTC(UHF)



مبدل AC/DC تفاضلی ولتاژ

اختلاف انتقال ولتاژ AC-DC δ از یک استاندارد انتقال به صورت زیرتعریف شده است:

$$\delta = \left.\frac{V_{ac} - V_{dc}}{V_{dc}}\right|_{E_{ac}=E_{dc}}$$

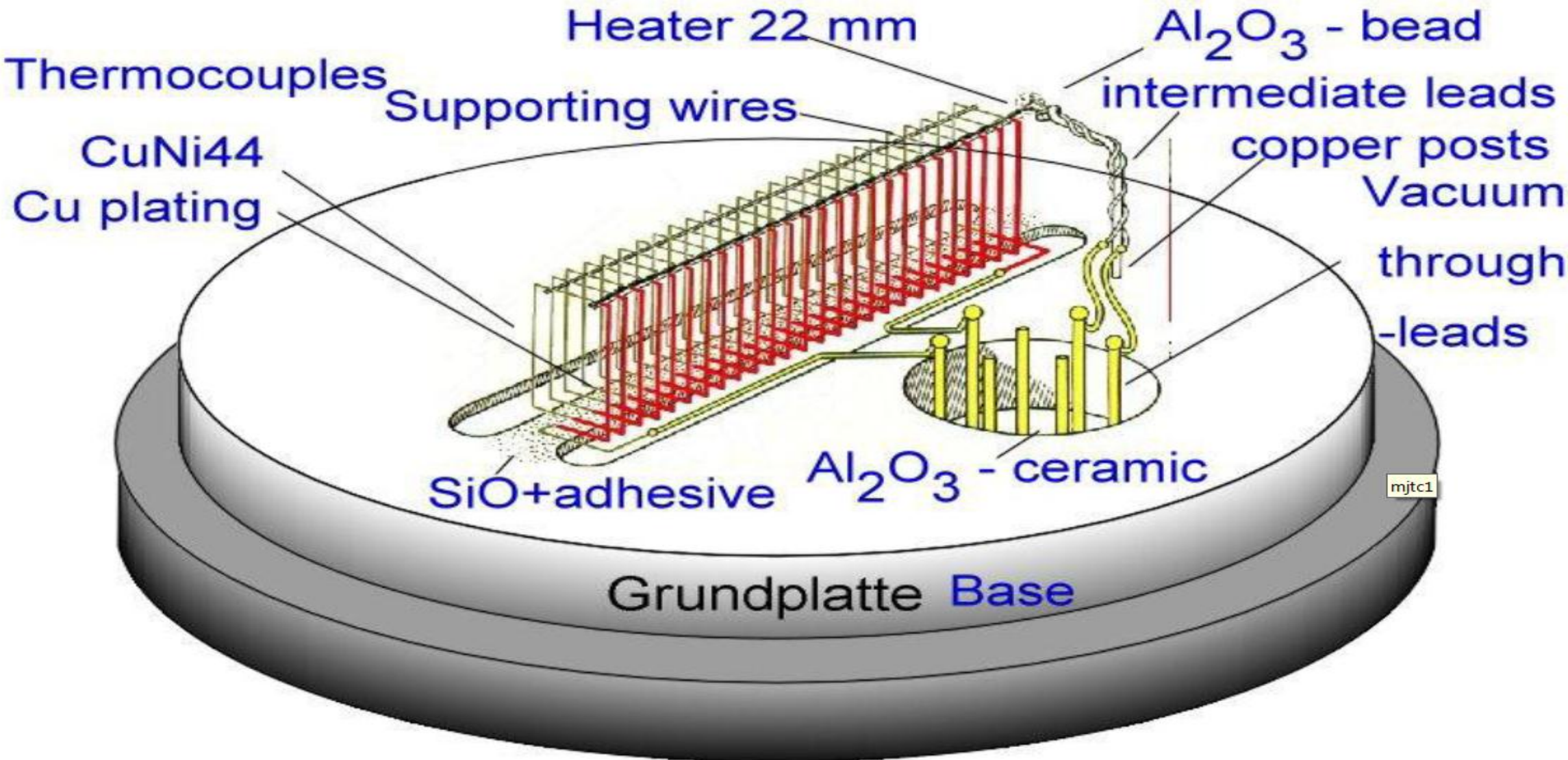
where V_{ac} is the rms value of the ac input voltage, V_{dc} is the dc input voltage, which when reversed produces the same mean output voltage of the transfer standard as V_{ac}. E_{dcN}, E_{dcR} and E_{ac} are the output voltages of the standard when the appropriate voltages have been applied.

$$|V_{dcN}| = |V_{dcR}| = V_{dc}$$

$$V_{ac} \neq V_{dc}$$

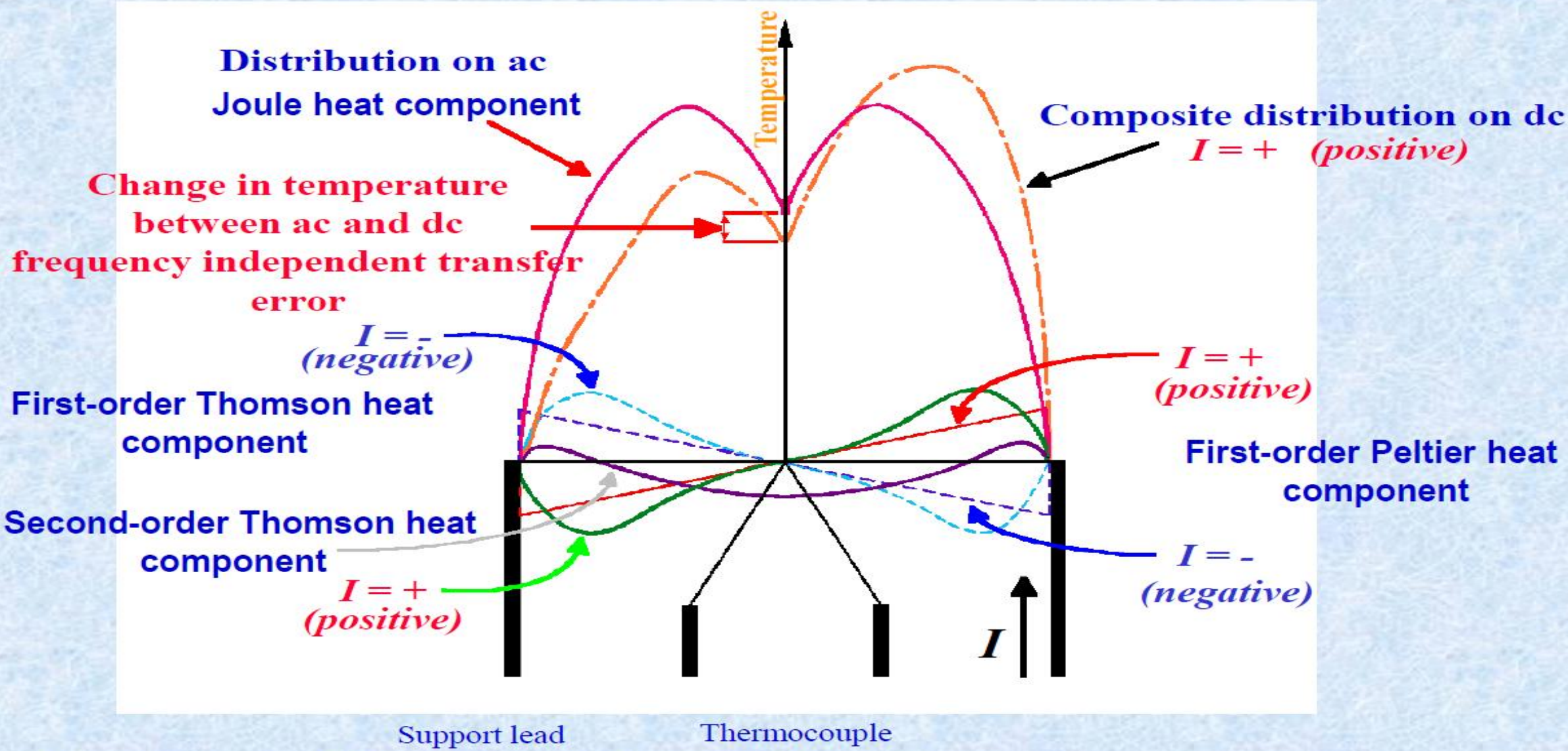
$$E_{dc} = \frac{E_{dcN} + E_{dcR}}{2} = E_{ac}$$

PTB 3-dimensional MJTC



http://www.ptb.de/en/org/2/21/212/mjtc.htm

توزیع دما بخاری SJTC

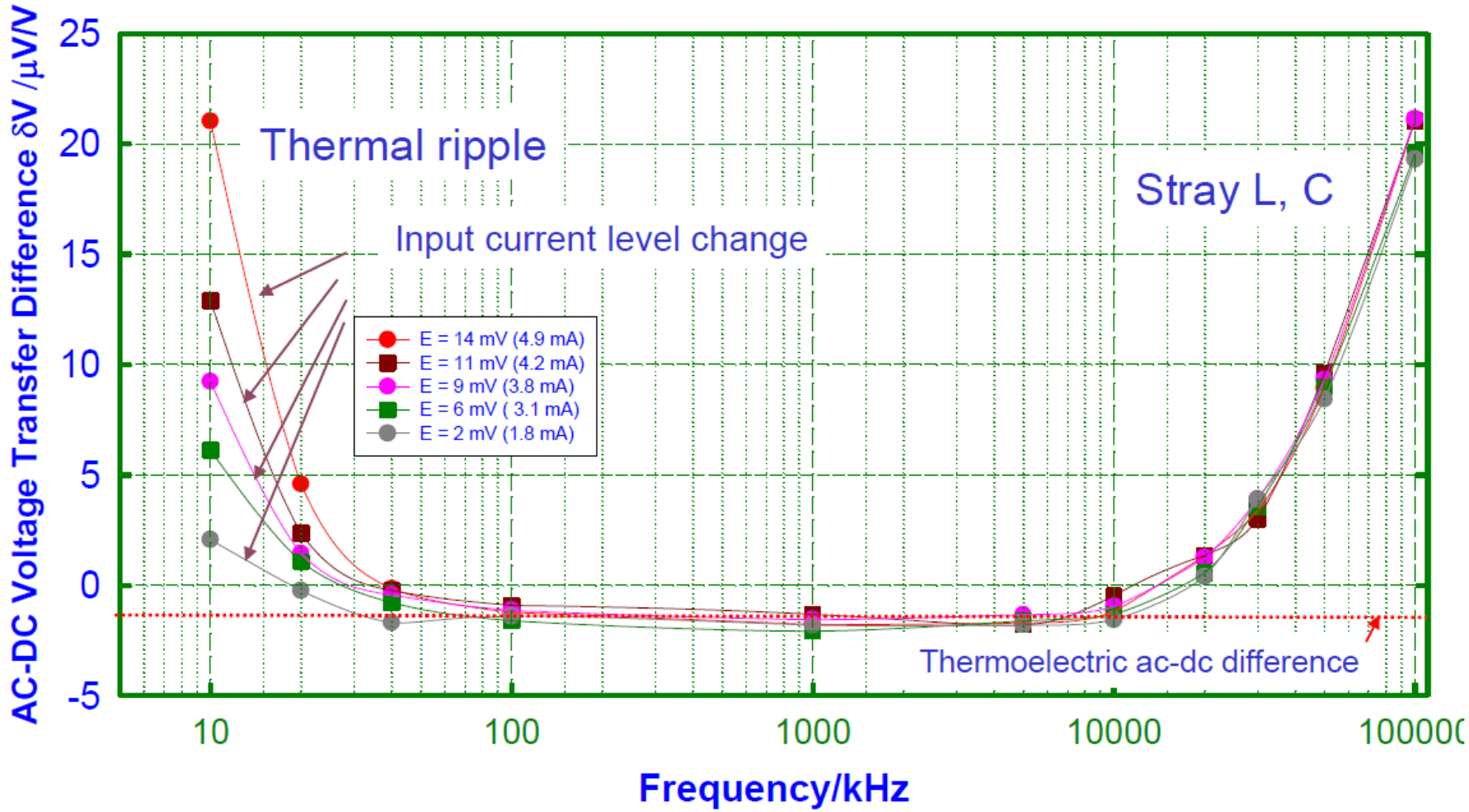


B. D. Inglis, Standards for AC-DC Transfer, *Metrologia*, vol. 29, p. 193, May 1992

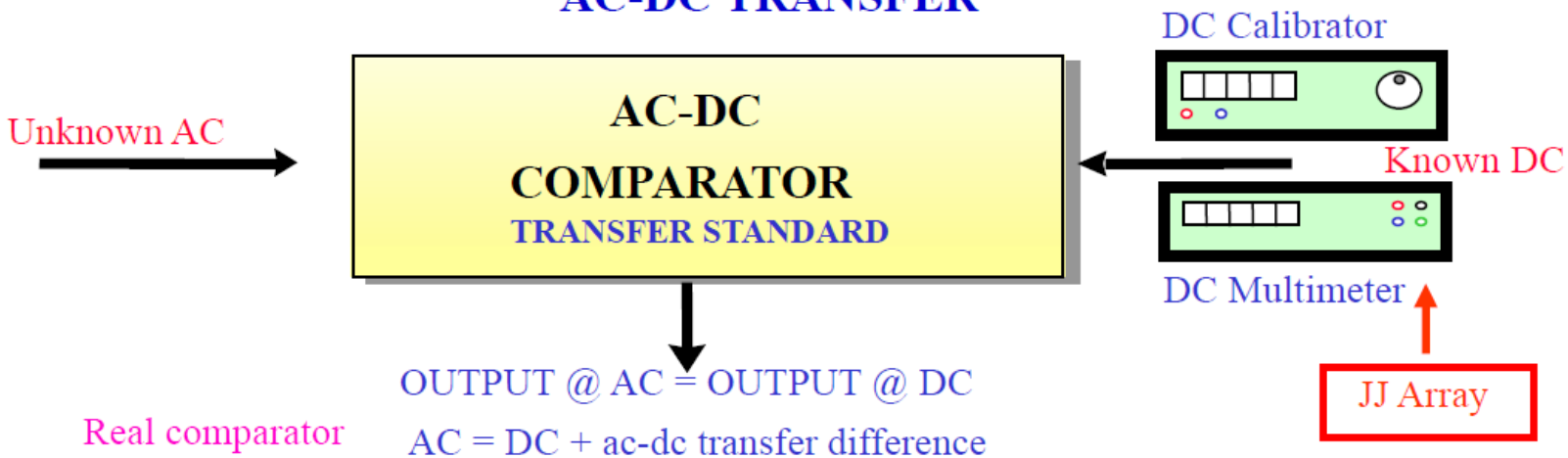
Shunt TVC - V2S1f 5 mA/1.1V/220 Ohm

AC-DC Voltage Transfer Difference

2 SJTC 90 Ohm/5 mA + approx. 40 Ohm series resistor

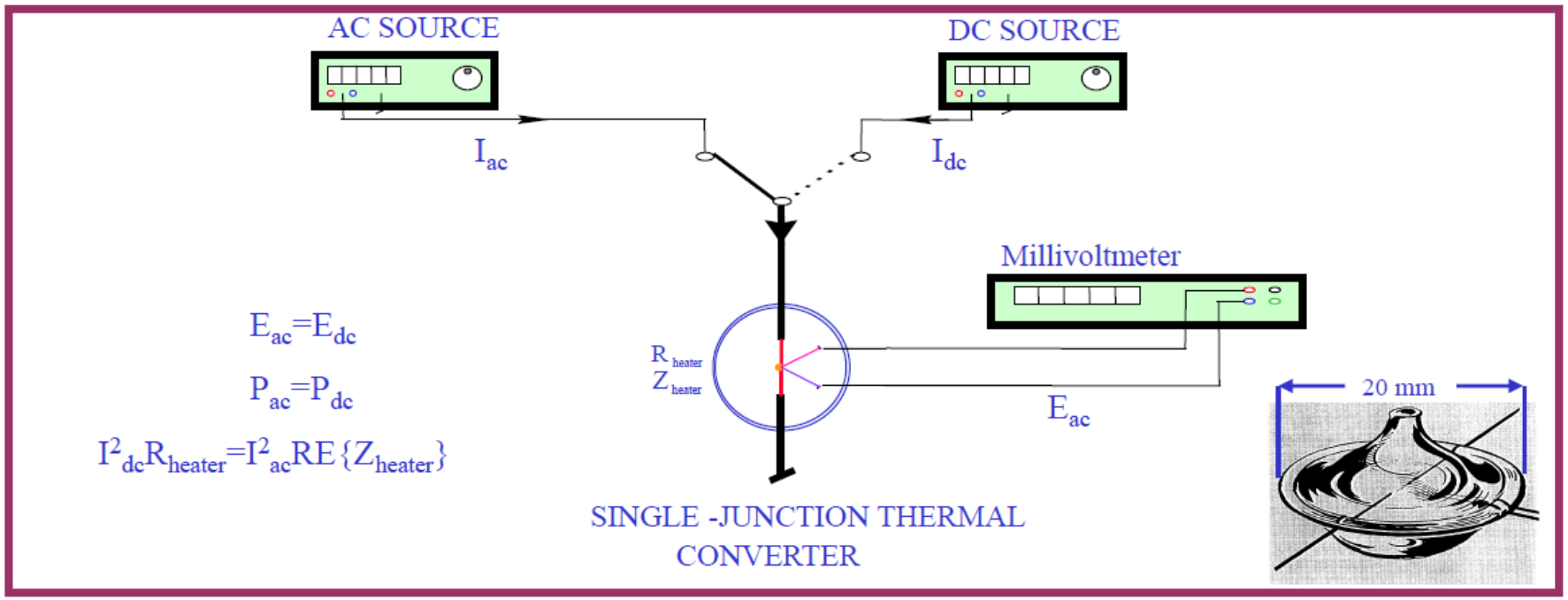


AC-DC TRANSFER



OUTPUT @ AC = OUTPUT @ DC

Real comparator AC = DC + ac-dc transfer difference



$\delta_{ac\text{-}dc}$ - ac-dc transfer difference

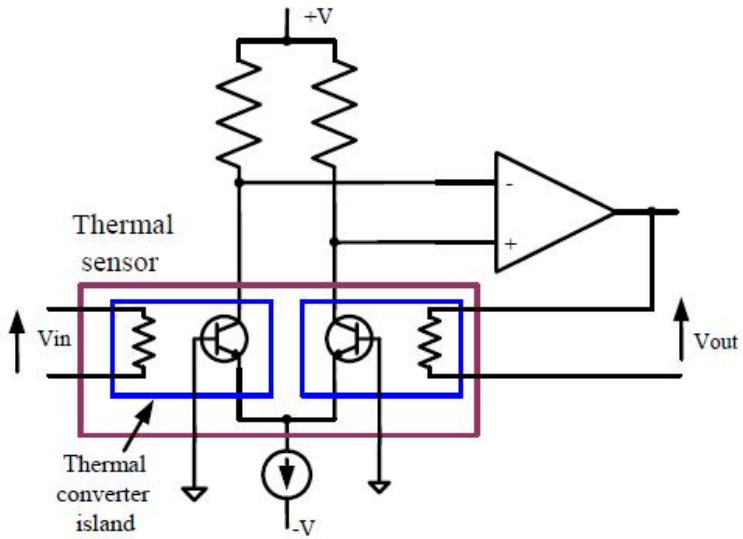
defined at the input

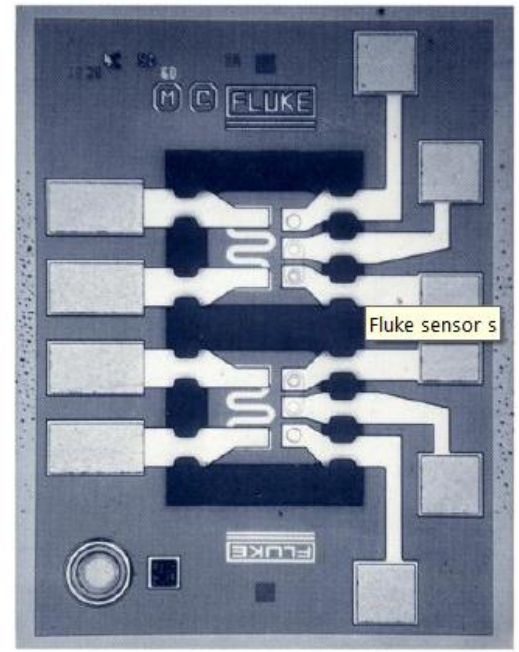
$$\delta_{ac-dc}=\left.\frac{V_{ac}-V_{dc}}{V_{dc}}\right|_{E_{ac}=E_{dc}}$$

defined at the output

$$\delta_{ac-dc}=-\left.\frac{E_{ac}-E_{dc}}{nE_{dc}}\right|_{E_{ac}=E_{dc}}$$

Fluke 792A AC-DC transfer standard





The patented Fluke Solid-State RMS Sensor.

Fluke 792A thermal sensor

Manual switch

The 792A consists of four main components: The Transfer Unit, Power Pack, 1000V Range Resistor and Transfer Switch.

Battery pack 792A transfer unit

1000 V range resistor

مقایسه استانداردهای انتقال ولتاژ پایین

در صورت داشتن هر گونه سوال و یا پیشنهاد از طریق ایمیل زیر در ارتباط باشید:

Mohamad.ghaemi1994@gmail.com