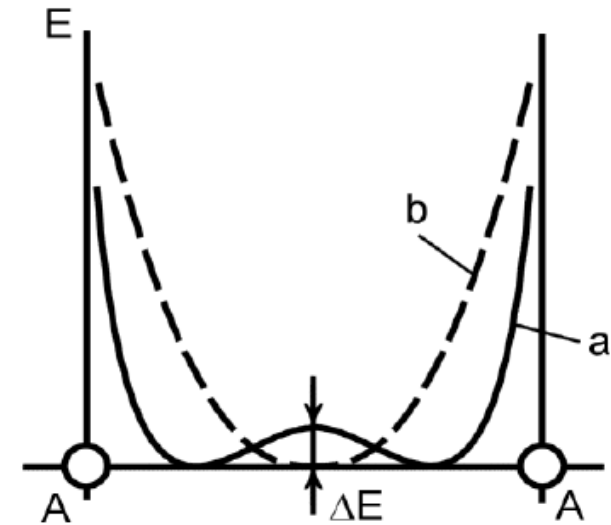
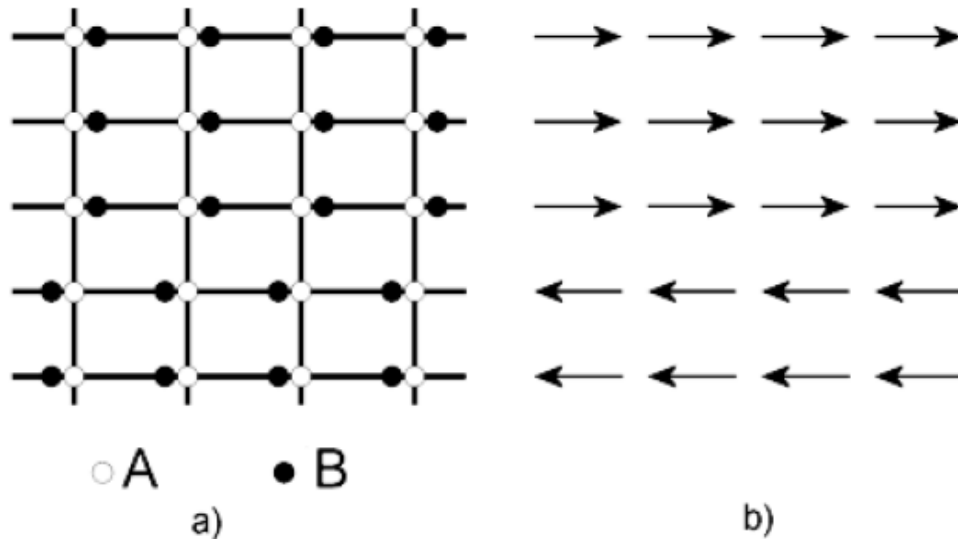


Seznam úloh na celý školní rok (podzimní i jarní semestr)

1. Rekombinace nadbytečných nositelů proudu v polovodičích, doba života nositelů.
2. A) Ramanova spektroskopie. (D. Hemzal)
B) Elektronová mikroskopie. (P. Mikulík)
3. Termoelektrické napětí v polovodiči.
4. Infračervená spektroskopie pevných látek. (F. Münz)
5. Voltampérové charakteristiky p-n přechodů.
6. Rentgenové studium strukturních vlastností multivrstev. (O. Caha)
7. A) Měření aktivační energie tvorby vakancí v kovech.
B) Absorpční hrana polovodičů. (F. Münz)
8. Feroelektrické vlastnosti pevných látek.
9. Elektrická vodivost, Hallův koeficient a magnetovodivost polovodiče, teplotní závislost pohyblivosti.
10. Technologie přípravy rezistoru a kondenzátoru na křemíkové desce.
(P. Mikulík)

Jedna úloha na dva týdny s výjimkou úloh 2A, B a 7A, B.

6. Feroelektrické vlastnosti pevných látek



elektrická susceptibilita diverguje blízko kritické teploty T_c (Θ Curieovy-Weissovy teploty)

$$\chi = \epsilon - 1 = \frac{C}{T - \Theta}$$

Landauova teorie fázových přechodů druhého druhu

$$F - F_0 = \frac{1}{2} C_1 P^2 + \frac{1}{4} C_2 P^4 + \dots$$

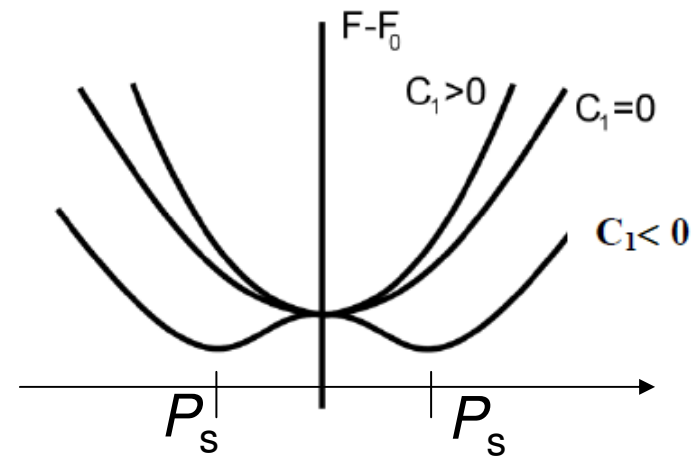
- C_1 je teplotně závislé $C_1 = (T - T_c)/C$
předpokládáme že v malém okolí nad i pod T_c je C_2 konstantní
- získáním konstant C a C_2 získáváme úplnou termodynamickou charakterizaci látky v blízkém okolí T_c – hlavní cíl praktika

podmínka pro rovnováhu: $(\partial F / \partial P)_P = 0$

$$0 = C_1 P_s + C_2 P_s^3$$

Pro $C_1 > 0$ je $P_s = 0$

Pro $C_1 < 0$ je $P_s^2 = -C_1 / C_2$



Obr. 4. Rozdíl volné energie polarizovaného a nepolarizovaného krystalu.

Landauova teorie fázových přechodů druhého druhu

Pustíme na to termodynamickou mašinérii...

$$dF = -SdT + EdP$$

$$E = (\partial F / \partial P)_T$$

Pro $T > T_c$

$$E = \partial F / \partial P = C_1 P$$

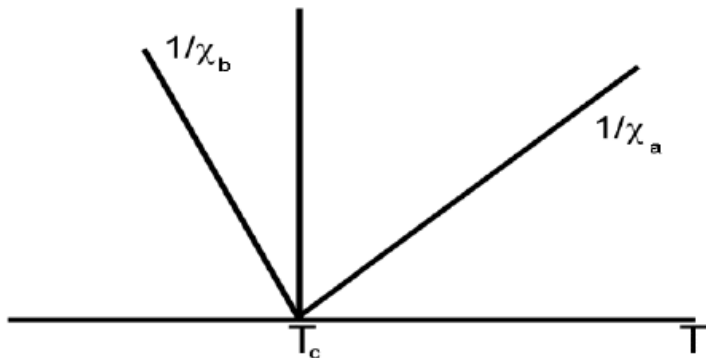
$$1/\chi_a = dE/dP = C_1$$

Pro $T < T_c$

$$E = C_1 P + C_2 P^3$$

$$1/\chi_b = dE/dP = \tilde{C}_1 + 3C_2 P^2, \quad P \cong P_S$$

$$1/\chi_b = -2 C_1$$



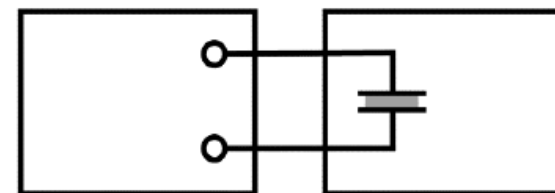
měřením teplotní závislosti dielektrické funkce

$\epsilon = 1 + \chi$ získáme C

$$\epsilon = \frac{4 \pi d C}{S}$$

- dvojnásobná směrnice $1/\chi$ pod přechodem než nad

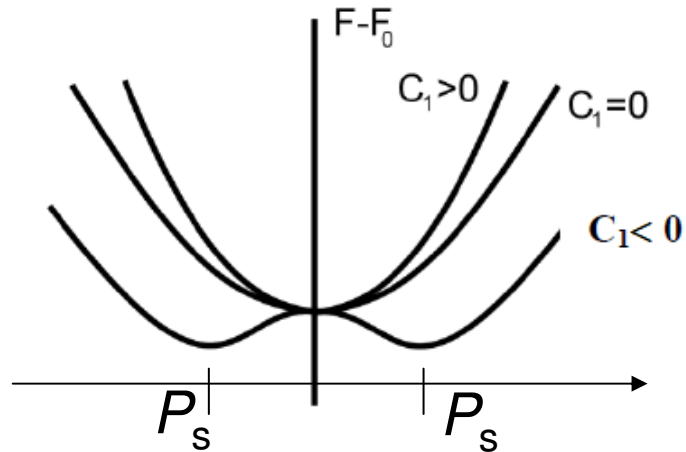
- susceptibilita $\chi \sim \epsilon$ má na T_c singularitu



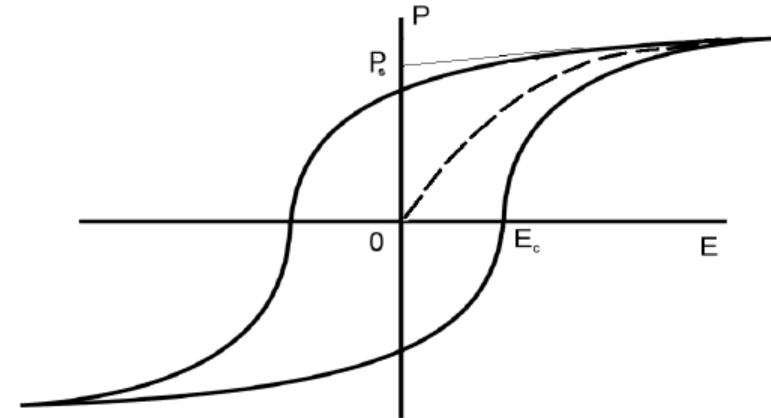
C-most

termostat

Elektrická polarizace



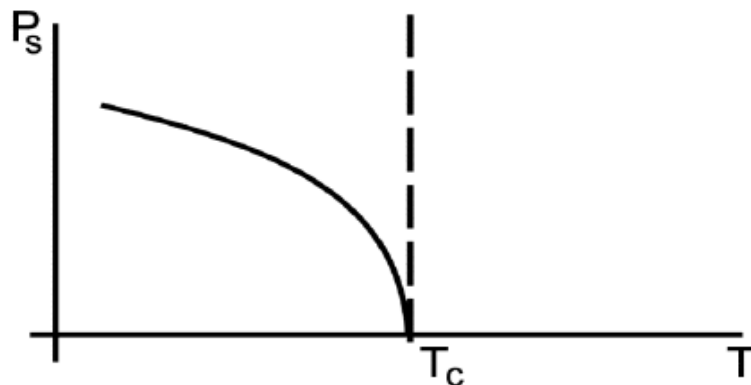
Obr. 4. Rozdíl volné energie polarizovaného a nepolarizovaného krystalu.



Obr. 3. Závislost polarizace na intenzitě elektrického pole – hysterezní smyčka.

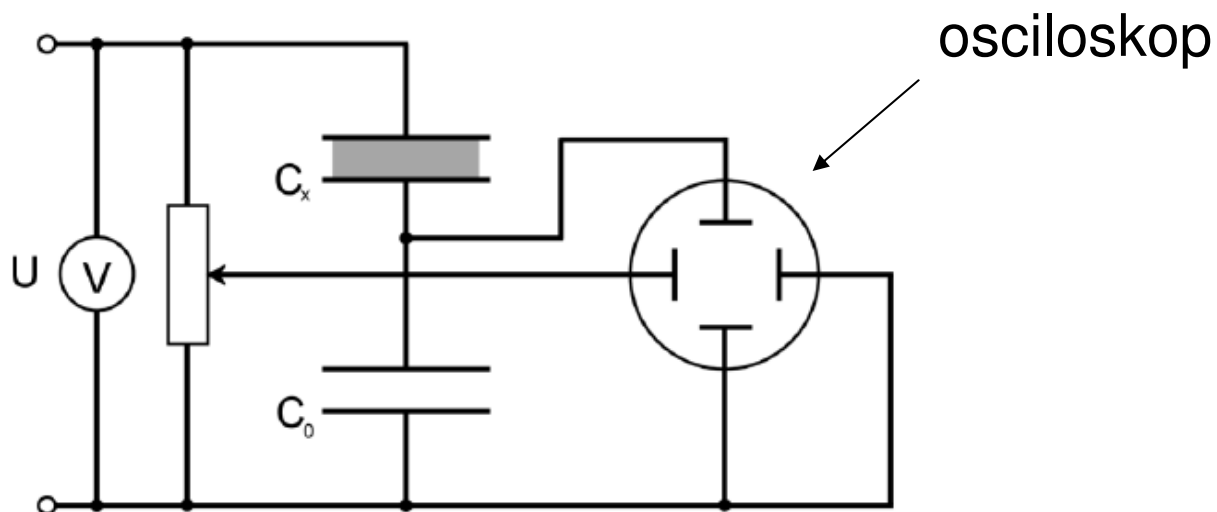
$$P_s^2 = -C_1 / C_2$$

změřením P_s při znalosti C_1 získáme C_2



- odmocninová závislost P_s na teplotě

měření elektrické polarizace



- horizontálně napětí U
- při $C_0 \gg C_x$ je prakticky všechno přiváděné napětí U na kondenzátoru se zkoumaným vzorkem C_x

$$C_x U_x = C_0 U_0 = Q, \quad P = \sigma, \text{ kde } \sigma \text{ je plošná hustota náboje,}$$

$$Q = \sigma S. \quad P = \frac{C_0}{S} U_0$$

U_0 měříme na vertikální ose osciloskopu

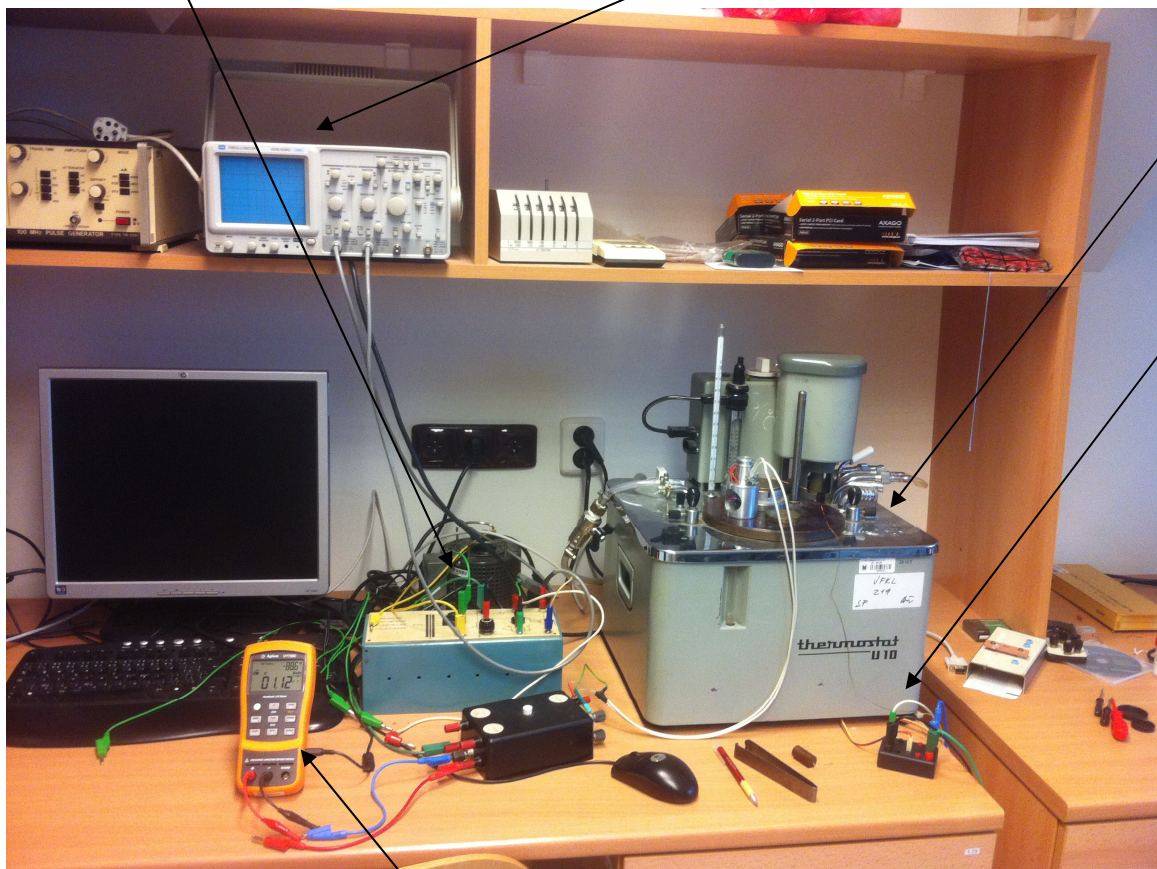
Experimentální vybavení

• zdroj vysokého napětí

osciloskop

termostat

přesné měření teploty pomocí Pt sondy



RCL meter Agilent U1733C

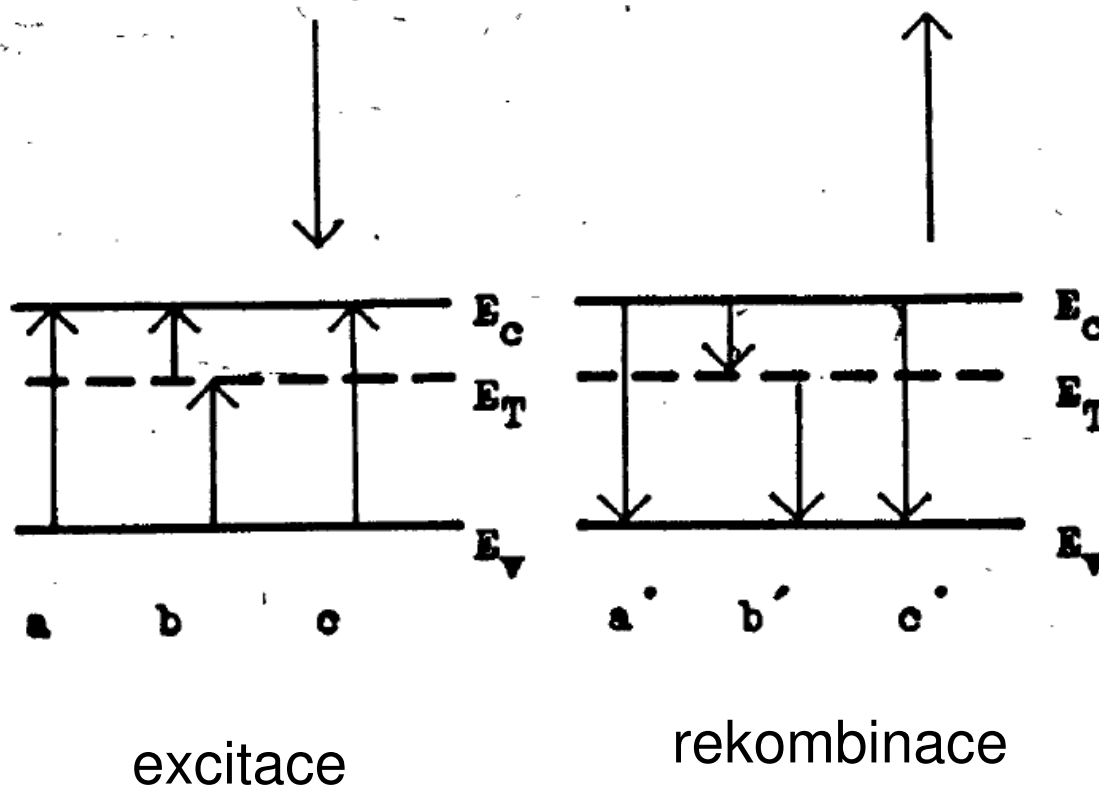
měří R, C, L, a i fázi mezi napětím a proudem



Průběh měření

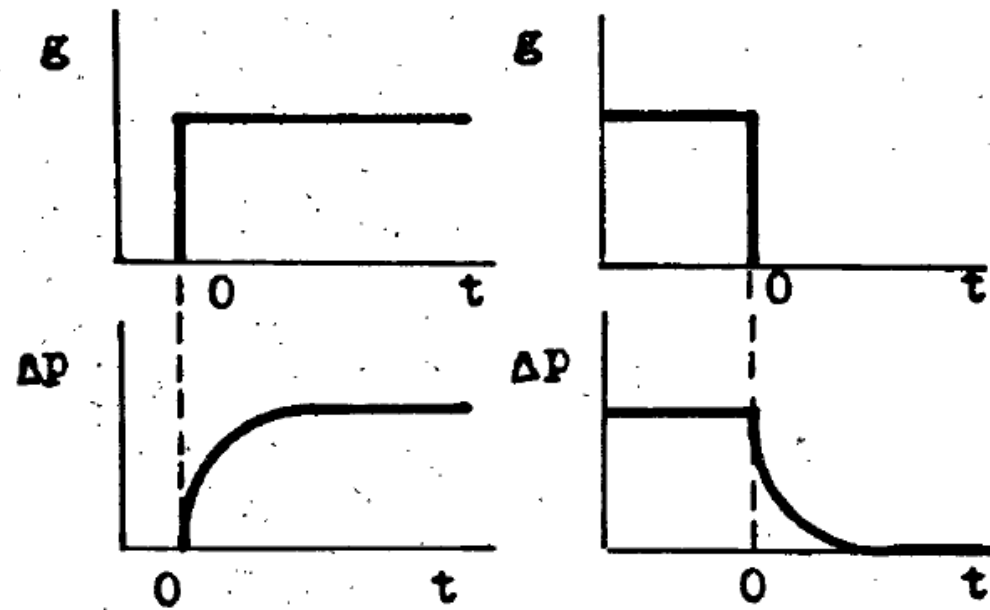
- zapojení aparatury
- instalace vzorku:
 - vzorek – monokrystal triglycinsuflátu $\text{CH}_2\text{NH}_2\text{COOH}$ (TGS)
 - očištění v lihu
 - pro vytvoření elektrického kontaktu mezi kondenzátorem a vzorkem (nutné pro změření polarizace) je potřeba vzorek „okontaktovat“ – potáhnout vrstvou grafitu
- díky formaci domén pod T_c doporučujeme nezávislé dva teplotní cykly pro změření kapacity (ϵ) a P_s .

1. Rekombinace nadbytečných nositelů proudu v polovodičích, doba života nositelů.



rekombinace s charakteristickou dobou (života) τ

Doba života



Obr. 6.4. Relaxace koncentrace nadbytečných nositelů.

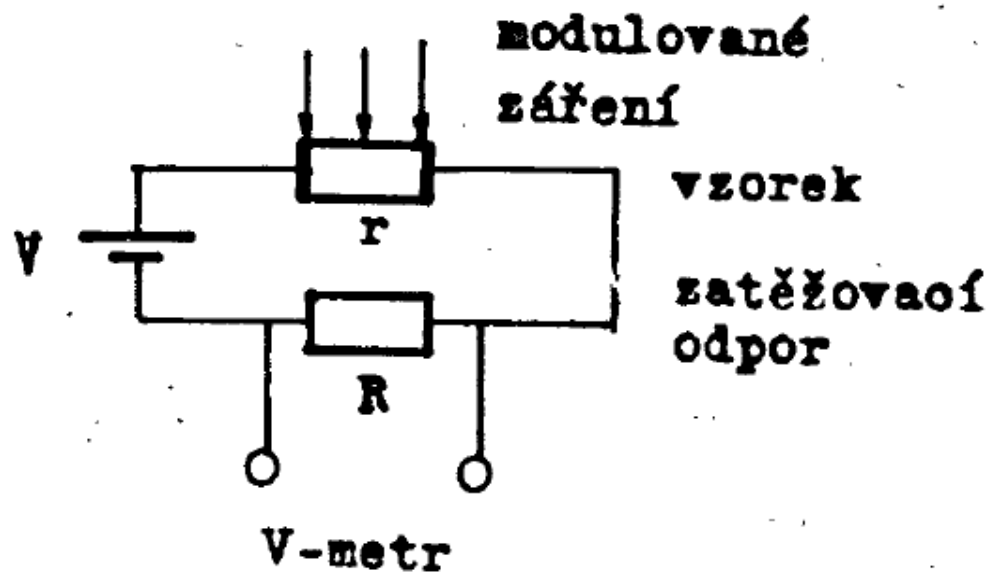
$$\Delta n = \tau \cdot \beta \cdot k \cdot g_0 \cdot (1 - e^{-t/\tau})$$

exponenciální nárůst (pokles) s dobou života τ

měření doby života nadbytečných nositelů



Měření doby života: měření fotovodivosti



Měření doby života: metodá fázové kompenzace

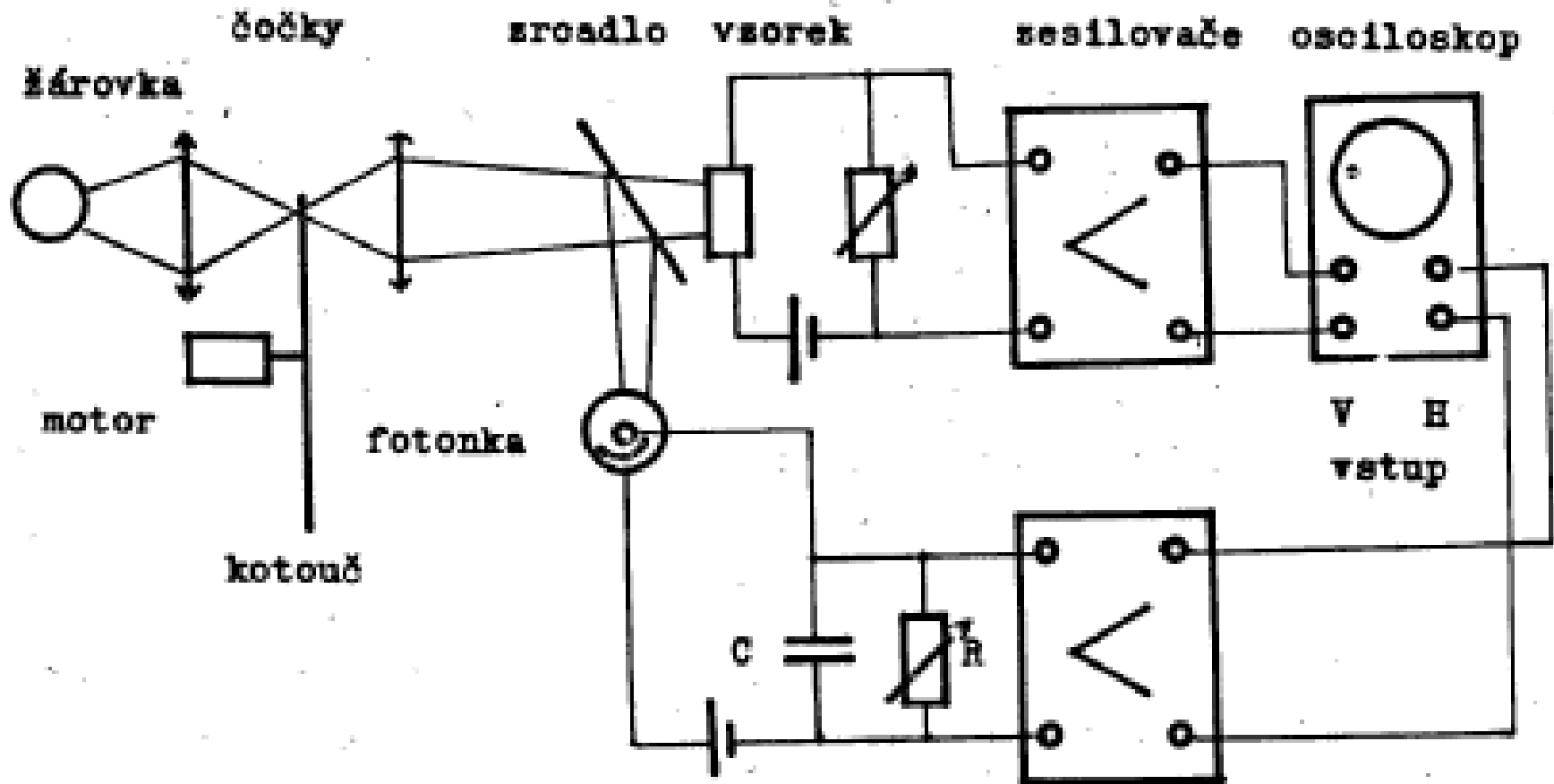
periodický osvit $g = g_m \cdot (1 - \cos \omega t)$

generuje periodickou koncentraci nadbytečných nositelů

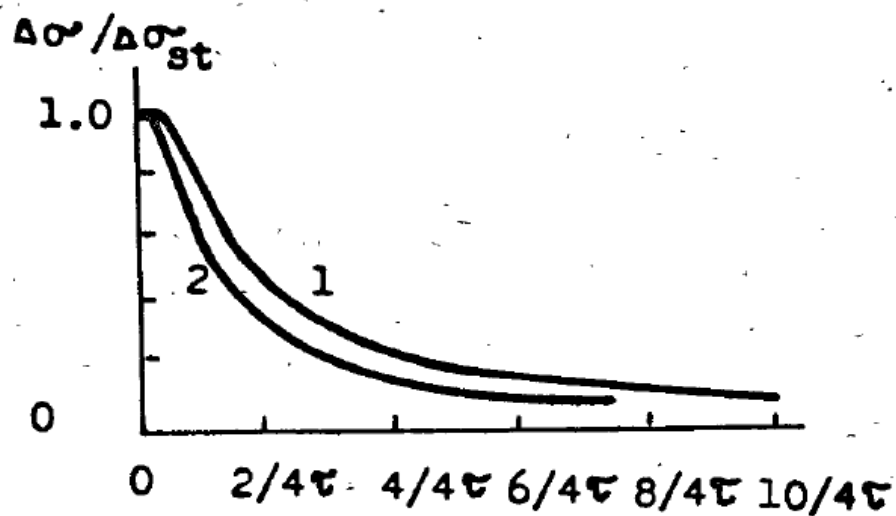
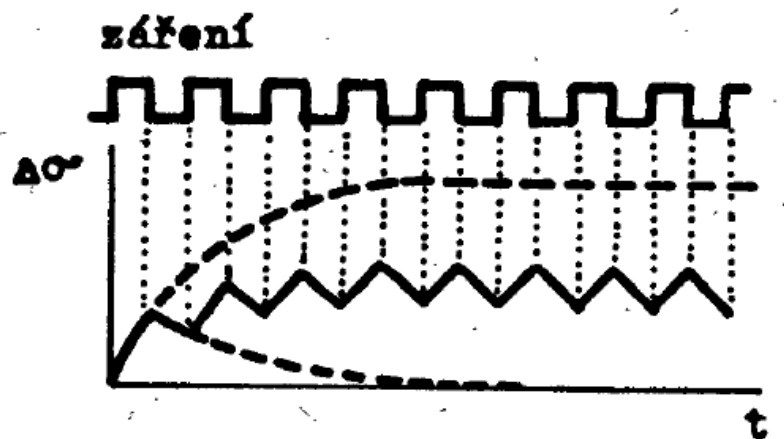
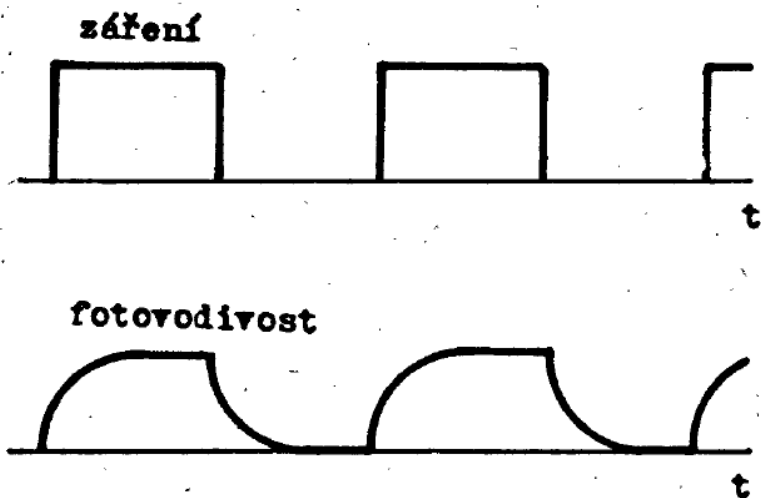
$$\Delta n = \frac{\beta \cdot k \cdot g_m \cdot \tau}{\sqrt{1 + (\tau \cdot \omega)^2}} \cdot \cos[\omega \cdot t - \arctg(\tau \cdot \omega)]$$

která je fázově posunuta oproti osvitu o $\arctg(\tau\omega)$.

Měření doby života: metodá fázové kompenzace

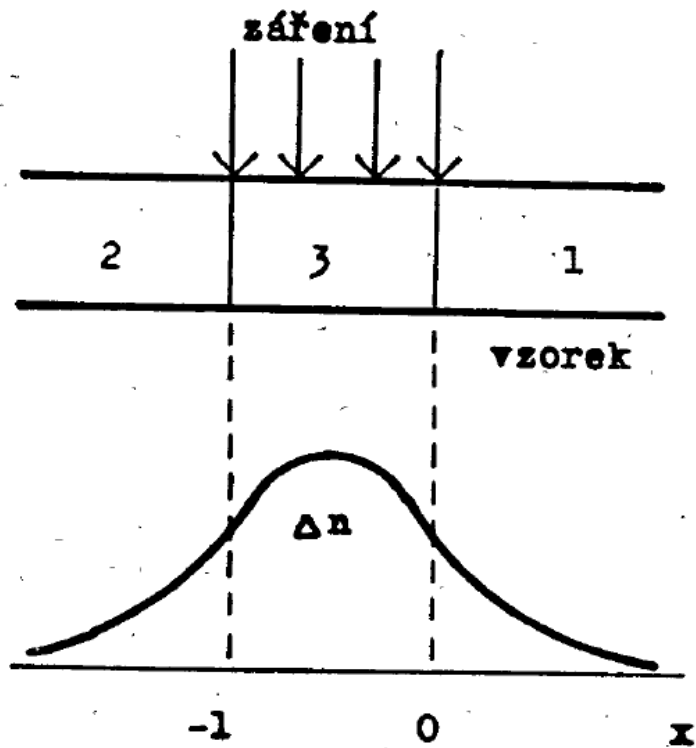


doba života - metoda frekvenčního poklesu fotovodivosti



$$\Delta \sigma = \Delta \sigma_{st} \cdot \text{th} \frac{1}{4 \cdot \tau \cdot f}$$

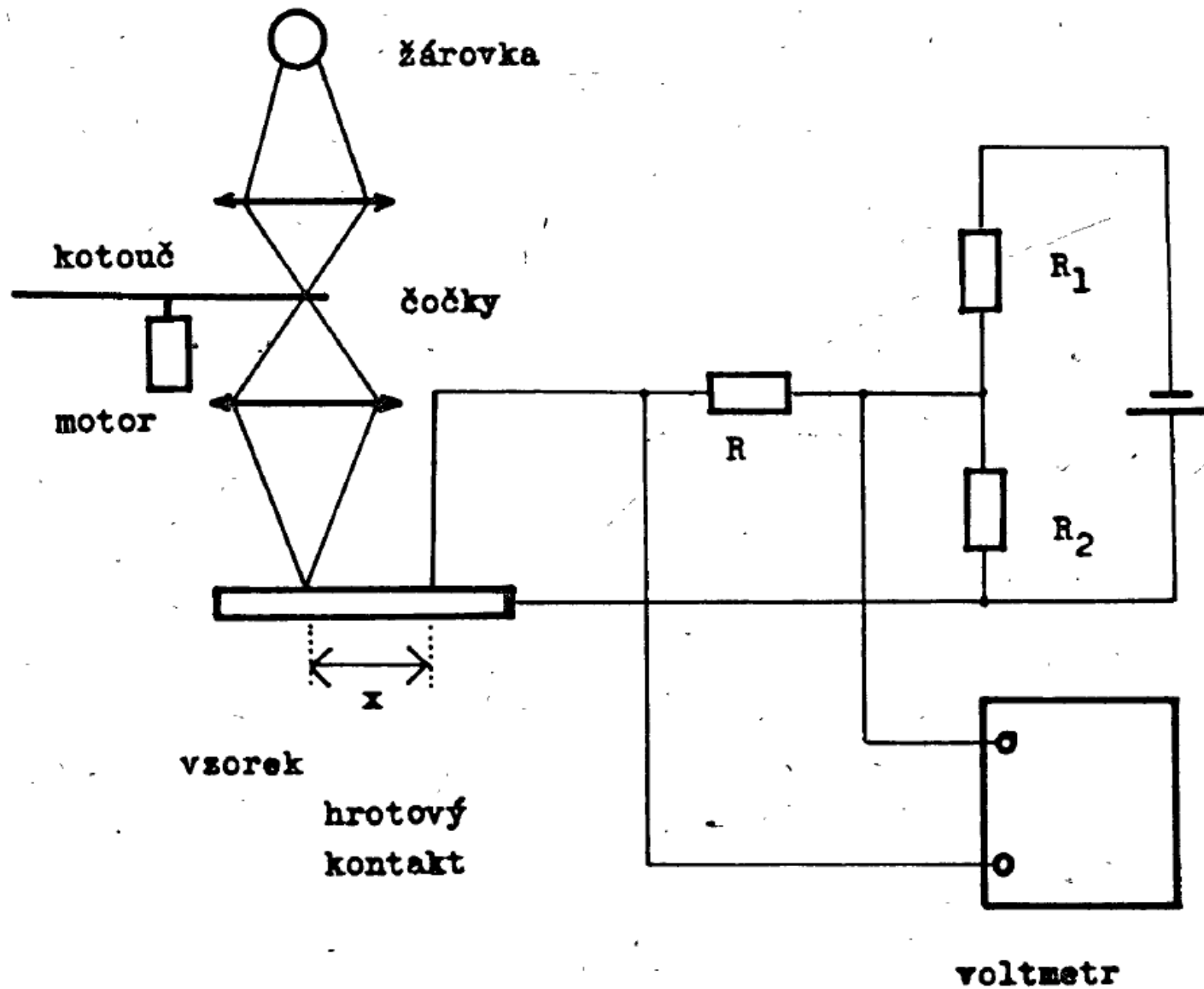
doba života - měření pomocí difúzní délky



$$\Delta n = \text{konst.} \cdot e^{-x/L_1}$$

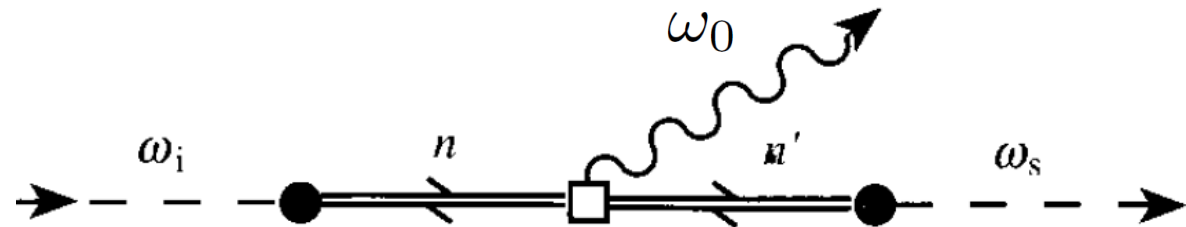
$$L_1 = L_2 = L = \sqrt{D \cdot \tau}$$

doba života - měření pomocí difúzní délky



2A) Ramanovská spektroskopie, P. Klenovský

Feynmanův diagram Ramanského procesu



- hlavně používaná na měření frekvencí fononů (vibrační spektroskopie)

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

- chemické složení, příměsi, mechanické napětí
- relativně dobré prostorové rozlišení díky fokusaci laserového paprsku (difrakčně limitované)

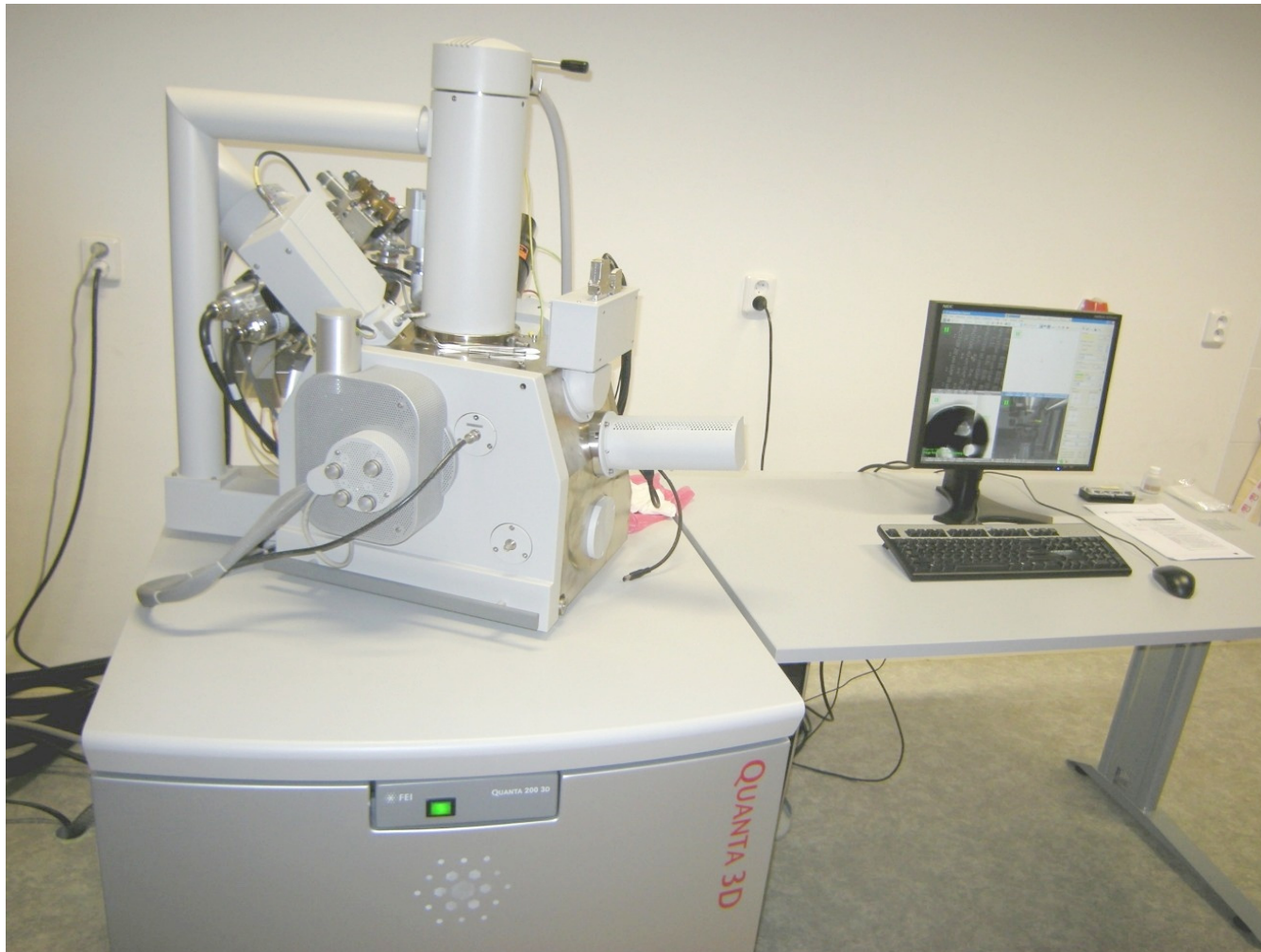
Renishaw Ramanský spektrometr s mikroskopem (objektivy 5x, 20x, 50x)
He-Ne laser (633) nm, Ar laser (514 nm)



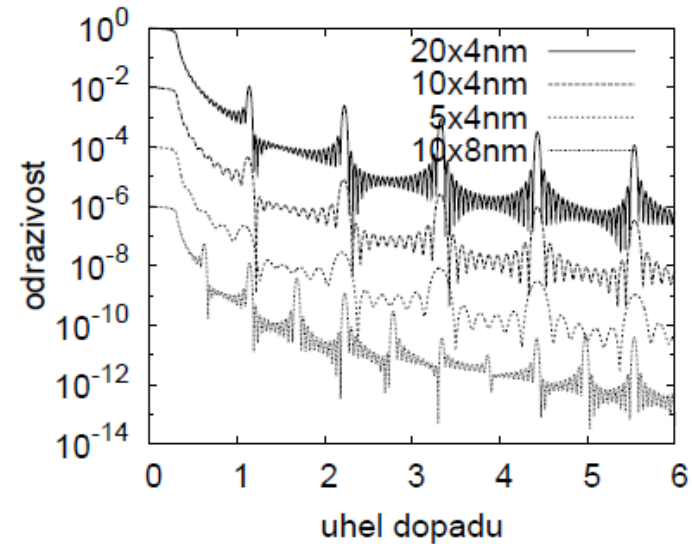
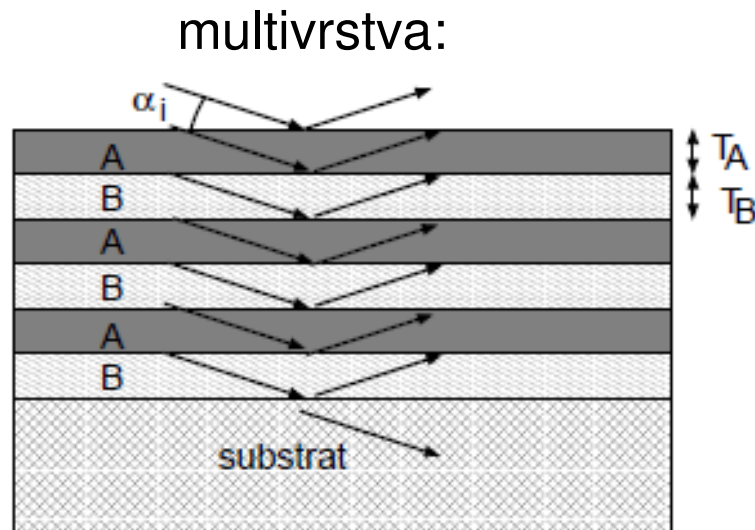
2B) Elektronová mikroskopie, *P. Mikulík*

nově instalovaný skenovací elektronový mikroskop firmy FEI

- napětí 200 V- 30 kV
- FIB (focused ion beam) - Ga



4. Rentgenové studium strukturních vlastností multivrstev, O. Caha



určení tloušťky multivrstvy:

$$(\alpha^{(m)})^2 - \alpha_{\text{crit}}^2 = \left(\frac{\lambda}{2T} m \right)^2$$

Analýza difrakčního záznamu polykrystalických vzorků

Braggova rovnice: $2d_{hkl} \sin \theta = \lambda$

ve vzorku s konečnou velikostí zrn mají difrakční maxima konečnou šířku => určení velikostí zrn

difraktometr "Huber"



5A) Měření aktivační energie tvorby vakancí v kovech

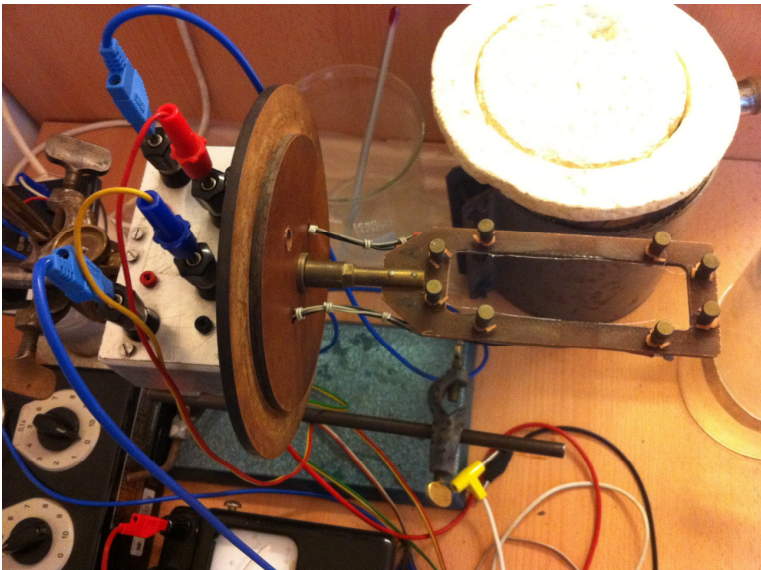
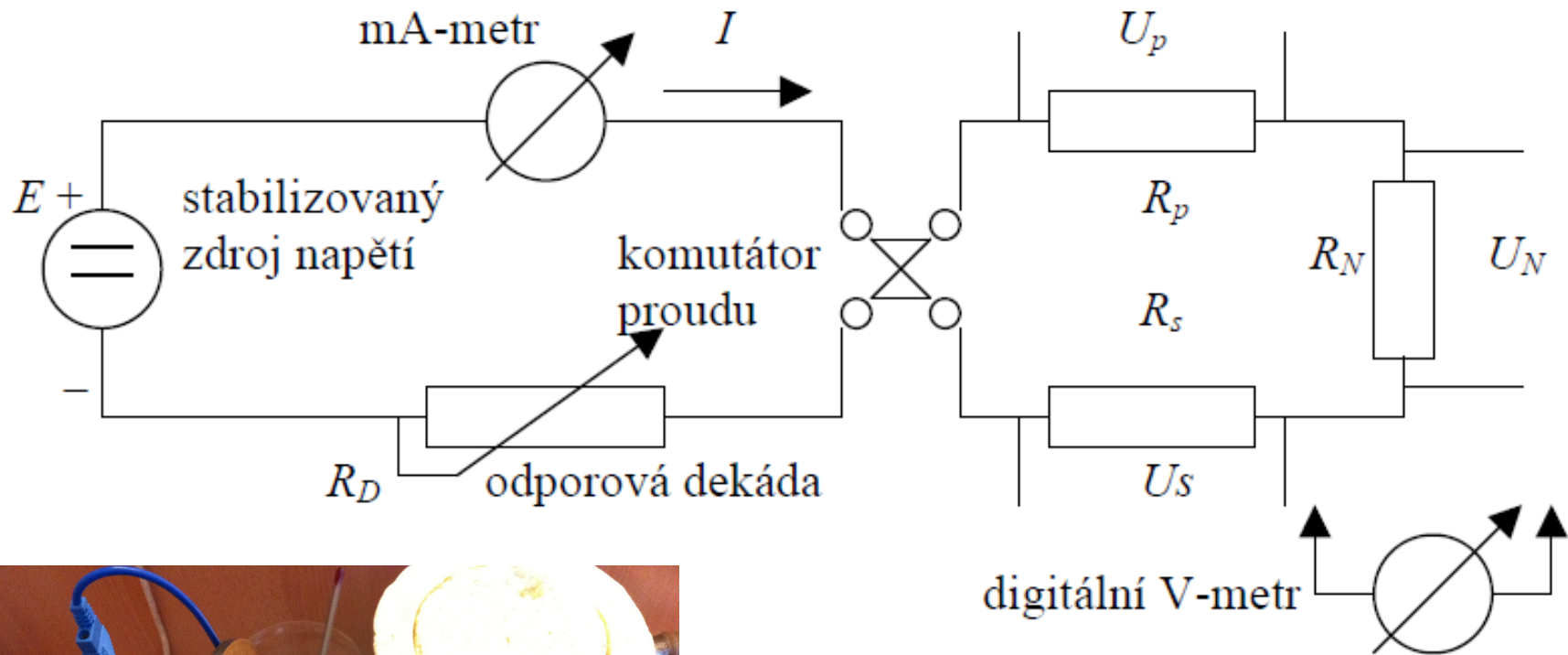
- rovnovážná koncentrace vakancí je dána Boltzmannovým rozdělením: $\frac{n}{N} = A \cdot e^{-\frac{E_V}{kT}}$
 $E_V =$ aktivační energie

odpor látky $\rho = \rho_m(T) + \rho_p$

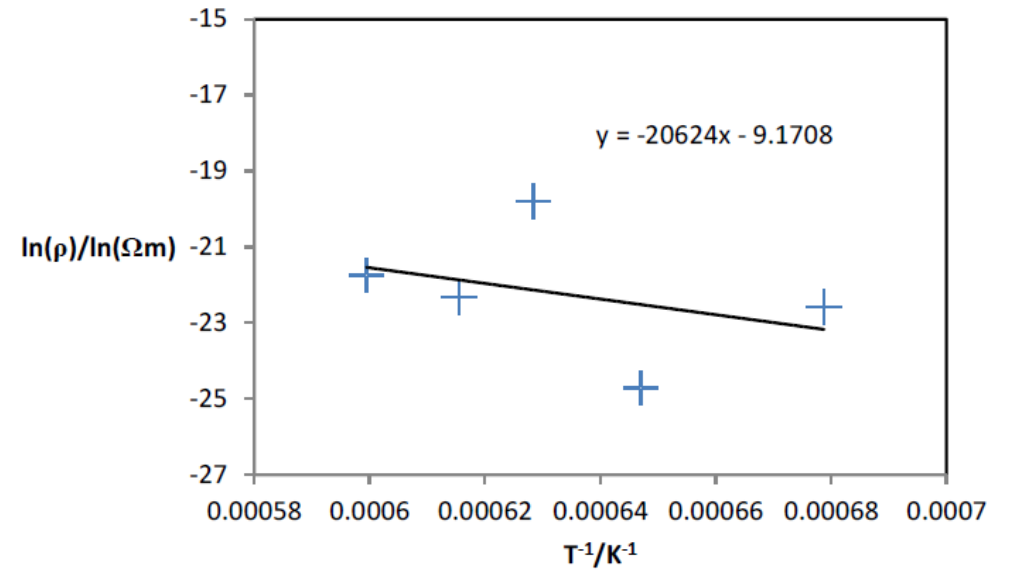
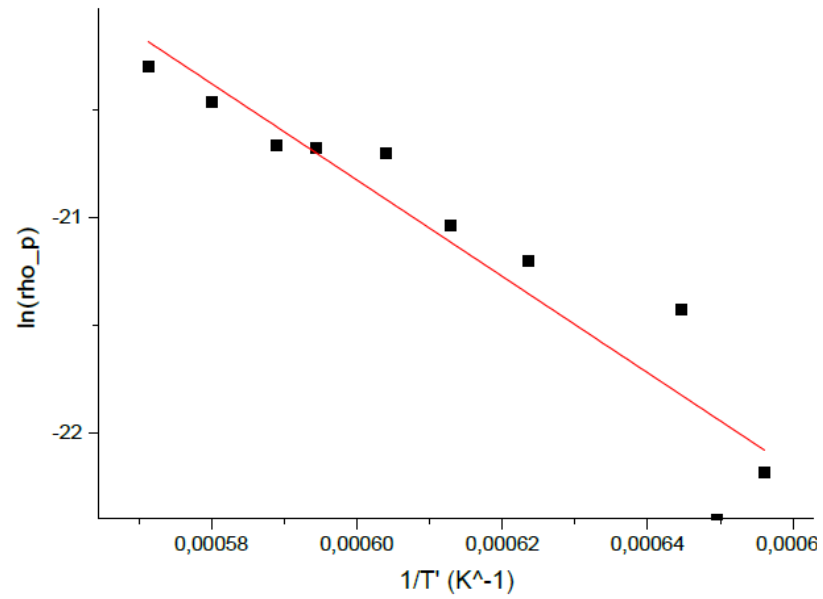
↑
odpor díky rozptylu na kmitech mříže

- odpor odpovídající rozptylu na vakancích $\rho_p = B \cdot e^{-\frac{E_V}{kT}}$
- odstranění nerovnovážné koncentrace vakancí žíháním
- zvyšování koncentrace vakancí kalením (metastabilní stav)

- změny odporu díky vakancím na 5. platné číslici
- nutná adekvátní přesnost měření



výsledek: závislost odporu na teplotě, ukázky dvou prací



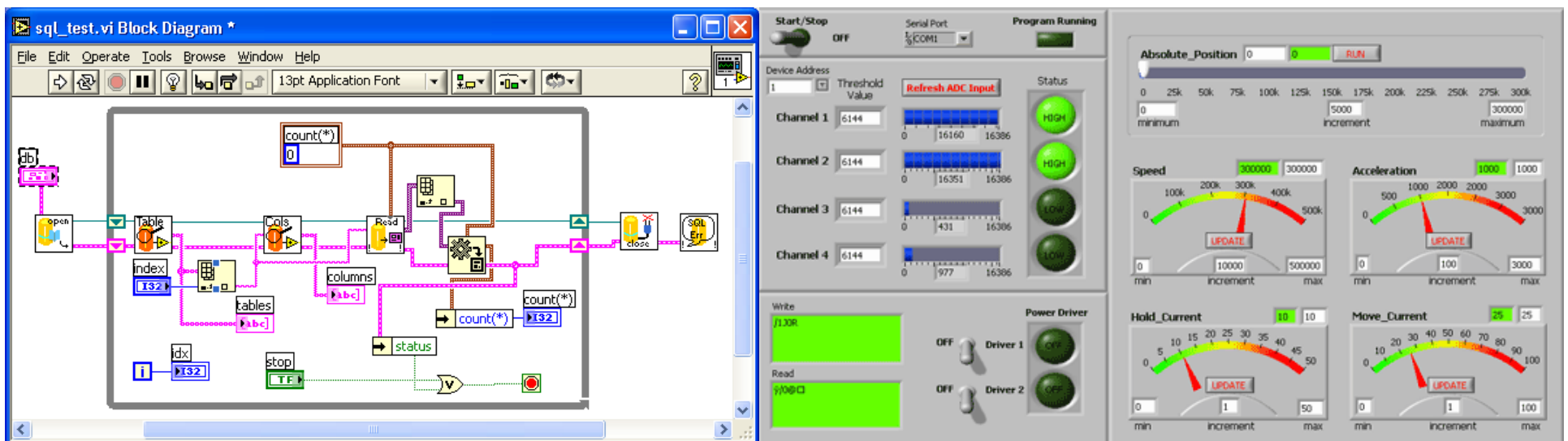
Ovládání experimentu počítačem

- kolik jazyků umíš, tolikrát jsi ...

existuje předmět F3300 Řízení experimentu počítačem, doc. Brablec

- nízkourovňové jazyky: c, c++, (a další jako fortran)
 - výhody: velká rychlost, numerická knihovna GSL
 - nevýhody: dlouhý kód, nutnost vytvoření hardwarové komunikace, nepřenositelný mezi platformami
 - rada (některých) zkušených: vyhni se nízkourovňovým jazykům pro ovládání experimentu, resp. kombinuj vysokoúrovňový a nízkourovňový jazyk
- vysokoúrovňové jazyky:
 - python:
 - interpretovaný jazyk, tedy univerzálnější ale pomalejší
 - důraz na jednoduchost
 - velké množství dobře dokumentovaných utilit pro komunikaci s hardwarem
 - přenositelný mezi platformami, ale potřebuje instalaci pythonu
 - často používaný v praxi
 - velké numerické knihovny používané i teoretiky

- vysokoúrovňové jazyky:
 - LabView
 - komerční jazyk speciálně vyvinut na ovládání experimentu počítačem (National Instruments), cena cca 40 000 Kč.
 - tedy velké množství nástrojů po ruce které se nemusí „shánět“
 - grafické programování G
 - velmi jednoduchá implementace grafického rozhraní
 - obtížné a pomalé pro složitější výpočty, ideálně propojit s nízkoúrovňovým jazykem
 - velmi rozšířený v komerční sféře
 - ... LHC je naprogramováno v LabView



Regresní analýza („fitování“)

- hledání hodnot parametrů funkce prokládáním dat
 - resp. hledání hodnot parametrů, jejich chyb a korelační matice
- neoptimálnější numerická implementace minimalizace čtverců odchylek je Marquardt-Levenbergův (ML) algoritmus. Kdo chce vědět více, chodte na Numerické metody, J. Chaloupka
- implementace ML algoritmu:
 - gnuplot:
 - nejrychlejší způsob fitování („na pár řádků“)
 - volně stažitelný program
 - možnost definovat (i komplexní) složité funkce po částech
 - pro rozsáhlejší situace může být příliš jednoúčelové, avšak pro praktikum bohatě dostačující
 - implementace i Gaussova příp. Gassova-Lorentzova profilu
 - python:
 - implementovány různé minimalizační procedury včetně ML
 - pro složitější funkce pomalé
 - ukázka viz program
5B_AbsorpcniHrana\FitovaniPython\vrstva.py

- C:
 - v GSL implementovány různé minimalizační procedury včetně ML
 - velmi rychlé
- C++:
 - přirozeně opět možno použít GSL
 - implementace ML od P. Mikulíka na <http://www.sci.muni.cz/~mikulik/freewareCZ.html#marqfitp>
 - velmi rychlé, pro rozsáhlejší programy možnost využití všech výhod objektového programování
- řada dalších programových balíčků
 - Octave (zdarma), Matlab, překvapivě nedávají chyby natož korelační matici
 - Origin, placené, (obtížné pro složitější funkce)

Rozhraní mezi přístrojem a počítačem

- seriový port
- GPIB
- USB
- LAN

Sériový port



- nebo také RS-232
- jeden z nejstarších (založen) a nejjednoduchších způsobů propojení. Standard stále udržován u velké řady přístrojů.
- možnost dokoupit kartu s RS-232 portem pro nové počítače (doporučeno pro rychlost), možnost dokoupit také redukci USB/RS 232
- rychlost přenosu max 115 kb/s, ale standardně méně, typicky 9600 b/s
- komunikace probíhá (většinou) kříženým kabelem, ne prodlužovacím (řečeno v manuálu přístroje)
- řada USB propojení simuluje sériový port

ukázka komunikace přes sériový port v pythonu 2.7

```
#Program na testovani reakce instrumentu na rs232, Keithley 325 teplotni kontroler
import sys
import serial #knihovna pro praci se seriovym portem

# rutina pro posilani RS-232 prikazu
def scpi(msg):
    global ser
    ser.write(msg+"\r\n") #ukonceni slova entrem (/r) a znakem pro novy radek (\n), dane typem pristroje
    return

# main program -----
NoSerPort=2 # COM3
ser=serial.Serial(NoSerPort)
print "Oteviram RS232 port cislo ", NoSerPort+1
#parametry komunikace, dane pristrojem
ser.baudrate=9600
ser.parity = serial.PARITY_ODD
ser.bytesize = serial.SEVENBITS
ser.stopbits = serial.STOPBITS_ONE
ser.xonxoff = 0

# poslani prikazu na odezvu instrumentu "IDN?"
scpi("*IDN?")
#vypsani odpovedi
print "odpoved na *IDN?:", ser.readline()

raw_input('press Enter...') # cekani pred zavrenim obrazovky
ser.close()
```

GPIB (general purpose interface bus)



- GPIB (general purpose interface bus)
- standard založen ~1960, je stále aktualizován a používán
- možnost připojení až 15-30 zařízení na jeden port v počítači
- relativně rychlá komunikace (8Mb/s) vzhledem k RS 232 (typicky ~10kb/s)
- drahá karta (~ 15 kkč)

ukázka GPIB komunikace v pythonu 2.7 přes VISA

- VISA = virtual instruments software architecture
- toto je obecný projekt pro unifikaci komunikace mezi počítačem a přístrojem implementovaný velkými společnostmi [Rohde & Schwarz](#), [Agilent Technologies](#), [Anritsu](#), [Bustec](#), [National Instruments](#), [Tektronix](#) a [Kikusui](#).
- je potřeba nainstalovat balík ovladačů od některé z těchto společností (doporučuji National Instruments, 57 MB)
- v rámci pythonu vznikl interface pyVISA na ovládání tohoto balíku

```
#vypis zarizeni a portu kompatibilnich s VISA v Pythonu 2.7 a pyVISA 1.5
import visa                                     #natahne knihovnu VISA
rm = visa.ResourceManager()                   #definuje objekt visa
print rm.list_resources()                     #vypise seznam adresovatelnych pristroju
```

```
obdrzeno: (u'ASRL1::INSTR', u'ASRL2::INSTR', u'ASRL7::INSTR',
u'ASRL10::INSTR', u'ASRL12::INSTR', u'GPIB0::22::INSTR')
```


syntaxe typu portů VISA (resources)

ENET-Serial INSTR	ASRL[0]::host address::serial port::INSTR
GPIB INSTR	GPIB[board]::primary address[::secondary address][::INSTR]
GPIB INTFC	GPIB[board]::INTFC
PXI BACKPLANE	PXI[interface]::chassis number::BACKPLANE
PXI INSTR	PXI[bus]::device[::function][::INSTR]
PXI INSTR	PXI[interface]::bus-device[.function][::INSTR]
PXI INSTR	PXI[interface]::CHASSISchassis number::SLOTslot number[::FUNCfunction][::INSTR]
PXI MEMACC	PXI[interface]::MEMACC
Remote NI-VISA	visa://host address[:server port]/remote resource
Serial INSTR	ASRLboard[::INSTR]
TCPIP INSTR	TCPIP[board]::host address[::LAN device name][::INSTR]
TCPIP SOCKET	TCPIP[board]::host address::port::SOCKET
USB INSTR	USB[board]::manufacturer ID::model code::serial number[::USB interface number][::INSTR]
USB RAW	USB[board]::manufacturer ID::model code::serial number[::USB interface number]::RAW
VXI BACKPLANE	VXI[board][::VXI logical address]::BACKPLANE
VXI INSTR	VXI[board]::VXI logical address[::INSTR]
VXI MEMACC	VXI[board]::MEMACC
VXI SERVANT	VXI[board]::SERVANT

GPIB - GPIB komunikace

ASRL – seriový port (RS-232 nebo RS-485)

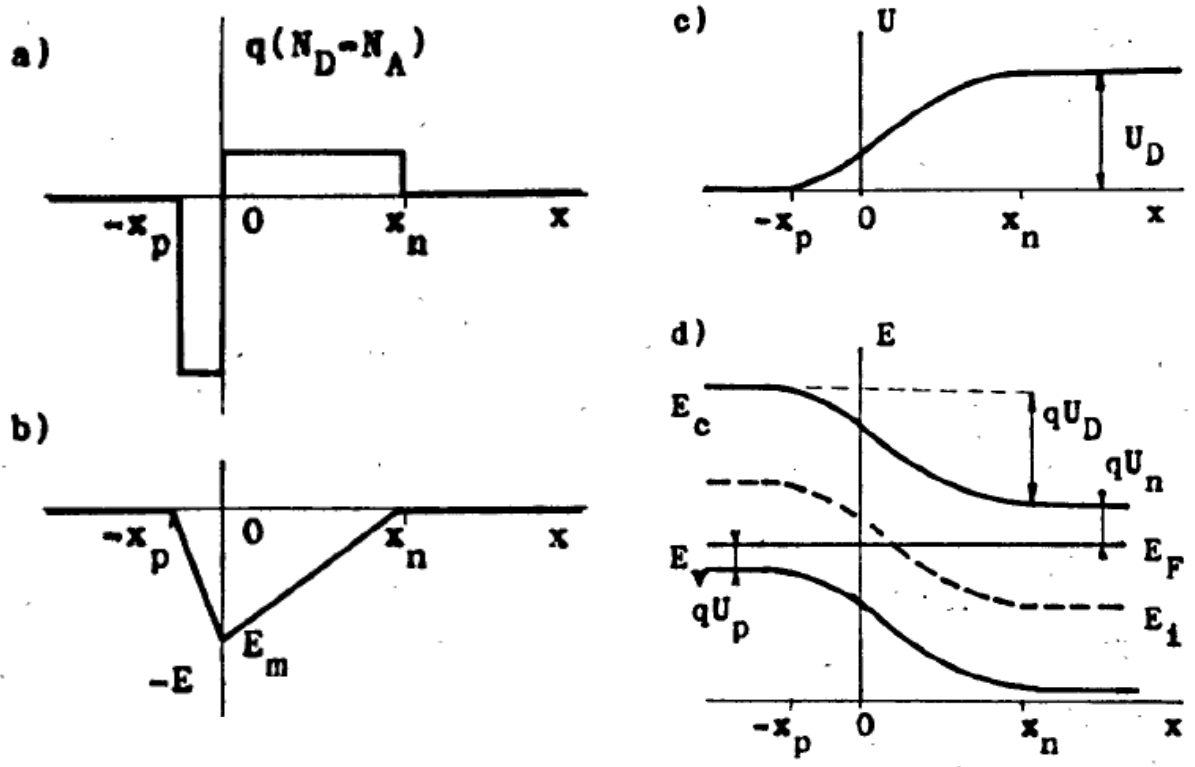
PXI keyword - PXI and PCI resources.

TCPIP - Ethernet communication.

syntaxe typu portů VISA (resources): příklady

ASRL::1.2.3.4::2::INSTR	A serial device attached to port 2 of the ENET Serial controller at address 1.2.3.4.
ASRL1::INSTR	A serial device attached to interface ASRL1.
GPIB::1::0::INSTR	A GPIB device at primary address 1 and secondary address 0 in GPIB interface 0.
GPIB2::INTFC	Interface or raw board resource for GPIB interface 2.
PXI::15::INSTR	PXI device number 15 on bus 0 with implied function 0.
PXI::2::BACKPLANE	Backplane resource for chassis 2 on the default PXI system, which is interface 0.
PXI::CHASSIS1::SLOT3	PXI device in slot number 3 of the PXI chassis configured as chassis 1.
PXI0::2-12.1::INSTR	PXI bus number 2, device 12 with function 1.
PXI0::MEMACC	PXI MEMACC session.
TCPIP::dev.company.com::INSTR	A TCP/IP device using VXI-11 or LXI located at the specified address. This uses the default LAN Device Name of inst0.
TCPIP0::1.2.3.4::999::SOCKET	Raw TCP/IP access to port 999 at the specified IP address.
USB::0x1234::125::A22-5::INSTR	A USB Test & Measurement class device with manufacturer ID 0x1234, model code 125, and serial number A22-5. This uses the device's first available USBTMC interface. This is usually number 0.
USB::0x5678::0x33::SN999::1::RAW	A raw USB nonclass device with manufacturer ID 0x5678, model code 0x33, and serial number SN999. This uses the device's interface number 1.
visa://hostname/ASRL1::INSTR	The resource ASRL1::INSTR on the specified remote system.
VXI::1::BACKPLANE	Mainframe resource for chassis 1 on the default VXI system, which is interface 0.
VXI::MEMACC	Board-level register access to the VXI interface.
VXI0::1::INSTR	A VXI device at logical address 1 in VXI interface VXI0.
VXI0::SERVANT	Servant/device-side resource for VXI interface 0.

9. Voltampérové charakteristiky n-p přechodů



Obr. 11.1. Strmý, ostře ohraničený přechod p-n;
 a) hustota náboje
 b) intenzita el. pole
 c) potenciál
 d) energie elektronů

$$I = I_s \cdot [\exp(q \cdot U / k \cdot T) - 1]$$

$$I_s = A \cdot j_s$$

$$j_s = q \left(\frac{D_p}{\tau_p} \right)^{1/2} \cdot \frac{n_i^2}{N_D} + q \left(\frac{D_n}{\tau_n} \right)^{1/2} \cdot \frac{n_i^2}{N_A}$$

- saturační proud I_s (j_s) závisí na kvadrátu intrinsické koncentrace
- $n_i \sim e^{E_g/kT}$

Měření pomocí pikoampérmetru Keithley 487



- zdroj napětí ± 500 V, v praxi používáme typicky jen ± 1 V, max ± 40 V
- omezený proud na max ± 2.5 mA
- manuální nastavení napětí (vhodné pro zvolení rozumného rozsahu napětí)
- programovatelné ovládání počítačem přes port GPIB
- přiložený kompletní manuál [Keithley487FullManual.pdf](#)

ANALOG OUTPUT

Rise Time
(10%–90%)

Analog Filter

OFF ON

RANGE	RESOLUTION	ACCURACY (1 Year)* 18°–28°C $\pm(\%rdg+offset)$	ANALOG OUTPUT	
			OFF	ON
2 nA	10 fA	0.3 + 500 fA	12 ms	70 ms
20 nA	100 fA	0.2 + 3 pA	4 ms	17 ms
200 nA	1 pA	0.15 + 20 pA	800 μ s	4 ms
2 μ A	10 pA	0.15 + 200 pA	380 μ s	2 ms
20 μ A	100 pA	0.1 + 2 nA	160 μ s	370 μ s
200 μ A	1 nA	0.1 + 20 nA	160 μ s	370 μ s
2 mA	10 nA	0.1 + 200 nA	160 μ s	370 μ s

programování pikoampérmetru přes GPIB

- dvě možnosti:
 - komunikace v jazyku Python 2.7 (doporučovaná)
 - komunikace v jazyku C (kompilátor MinGW v prostředí CodeBlocks, systém WinXP)
- Je potřeba
 - definice proměnných
 - výstup na obrazovku, vstup z klávesnice
 - cykly
 - podmínky
 - uložení do souboru

Ukázka programu pro ovládání Keithley 487 v jazyku python

```
#Demo pro studenty na nejjednoduchsi ovladani pikoampermetru Keithley 487
import visa                                #nacteni knihovny VISA
import time                                #nacteni knihovny na casovou prodlevu
rm = visa.ResourceManager()               # definice objektu pro komunikaci VISA
keithley = rm.get_instrument("GPIB0::22::INSTR") #definice objektu s adresou GPIB s cislem 22

#Prikazy ke Keithley 487 jsou vzdy ve formatu retezce a ukonceny X
#pokud se posle neplatny prikaz, na displeji se objevi IDDC

#Nasleduje nastaveni pikoampermetru
keithley.write("R0X")                      # nastav autorange.
#print("Probiha nulovani pikoampermetru\n")
#keithley.write("C2X")                      # proved corekci na nulu. Toto chvili trva, muze se vypnout pro testovani
programu
keithley.write("C0X")                      # vypni zero check
keithley.write("O1X");                     # nastavi zdroj na operate

keithley.write("V0.1X")                    # nastav proud na 0.1V
time.sleep(0.05)                           #pocka [sekund] na ustabilizovani proudu
print "odezva pikoampermetru:", keithley.read() #vypis proud
```

Ukázka programu pro ovládání Keithley 487 v jazyku C

počáteční definice

```
#include <stdio.h> // vstup-vystup
#include <windows.h> //potreba jen pro funkci Sleep
#include "decl-32.h" // GPIB ovladac, pouze hlavickovy soubor .h
// je potreba prilozit pro linkovani zkompilovany ovladac gpib-32.obj
// v prostredi Code::Blocks se toto dela skrz Project->Build options -> Linker
Settings
```

```
#define ARRAYSIZE 100 // Size of read buffer
int Dev; // Device handle
char ReadBuffer[ARRAYSIZE + 1]; // Read data buffer
float V; // vstupni napeti cislo
char Vchar[40]; // vstupni napeti retezec znaku
int delkaVchar;
char lchar[12]=""; // vystupni proud retezec znaku
int i;
```


chybová procedura

```
void GPIBCleanup(int ud, char* ErrorMessage)
{
    printf("Error : %s\nibsta = 0x%x iberr = %d\n",
        ErrorMessage, ibsta, iberr);
    if (ud != -1)
    {
        printf("Cleanup: Taking device offline\n");
        ibonl (ud, 0);
    }
}
```

Inicializace GPIB portu

```
int _cdecl main(void) {

#define BDINDEX          0    // Board Index
#define PRIMARY_ADDR_OF_DMM  22  // Primary address of device
#define NO_SECONDARY_ADDR  0    // Secondary address of device
#define TIMEOUT          T10s // Timeout value = 10 seconds
#define EOTMODE          1    // Enable the END message
#define EOSMODE          0    // Disable the EOS mode

// Inicializace zarizeni Dev
Dev = ibdev (BDINDEX, PRIMARY_ADDR_OF_DMM,
NO_SECONDARY_ADDR, TIMEOUT, EOTMODE, EOSMODE);
if (ibsta & ERR) { GPIBCleanup(Dev, "Unable to open device"); return 1; }

/*Clear the internal or device functions of the device. If the error
 * bit ERR is set in ibsta, call GPIBCleanup with an error message. */
ibclr (Dev);
if (ibsta & ERR){ GPIBCleanup(Dev, "Unable to clear device"); return 1; }
```

nastavení pikoampérmetru, nulování

```
//Prikazy ke Keithley 487 jsou vzdy ve formatu retezce a ukonceny X
// pokud se posle neplatny prikaz, na displeji se objevi IDDC
ibwrt (Dev, "R0X", 3); // nastav autorange.
printf("Probiha nulovani pikoampermetru\n");
ibwrt (Dev, "C2X", 3); // proved corekci na nulu
ibwrt (Dev, "C0X", 3); // vypni zero check
ibwrt (Dev, "O1X", 3); // nastavi zdroj na operate
```

```
if (ibsta & ERR) { GPIBCleanup(Dev, "Error zerocheck the device");
return 1; }
```

nastavení napětí, kontrola vstupu, přečtení proudu

```
V=1; //požadovane napeti ve forme cisla
```

```
if (abs(V)>50){
```

```
    printf("Pozadovane napeti je vetsi nez bezpecny limit 50 V");
```

```
    ibonl (Dev, 0);
```

```
    return 1;
```

```
}
```

```
delkaVchar =sprintf(Vchar, "V%2.3fX", V); //vytvoreni retezce z cisla v
```

```
požadovanem formatu
```

```
printf("Vchar je %s", Vchar);
```

```
ibwrt (Dev, Vchar, delkaVchar); // nastaveni pikoampermetru na požadovane  
napeti
```

```
Sleep(100); //pocka dobu v ms, aby se ustabilizovalo napeti
```

```
ibrd (Dev, ReadBuffer, ARRAYSIZE); // precte proud ze zarizeni
```

```
if (ibsta & ERR){ GPIBCleanup(Dev, "Unable to read data from device"); return  
1; }
```

```
printf("Returned string: %s\n", ReadBuffer); // Navraceny retezec je text s  
cislem napr.: NDCI+0.00018E-09
```

zpracování obrženého řetězce, vypnutí komunikace

```
for (i=4;i<ibcnt-2;i++){lchar[i-4]=ReadBuffer[i];}  
lchar[12] = '\0'; // ukoncuje string v jazyku c  
printf("lchar je %s\n", lchar);
```

```
system("pause"); // ceka na stisk klavesy
```

```
ibwrt (Dev, "O0X", 3); // vypne operate  
Sleep(100); //pocka dobu v ms,  
ibonl (Dev, 0);
```

```
return 0;
```

```
}
```

zobrazení výsledků uložených do souboru v programu gnuplot, skript plot_VAchar.plt

```
set grid  
#set log y
```

```
plot 'VAchar.dat' us 1:2 title 'VA char' w lp 1 1
```

```
pause -1
```

logaritmické zobrazení:

```
set grid  
set log y
```

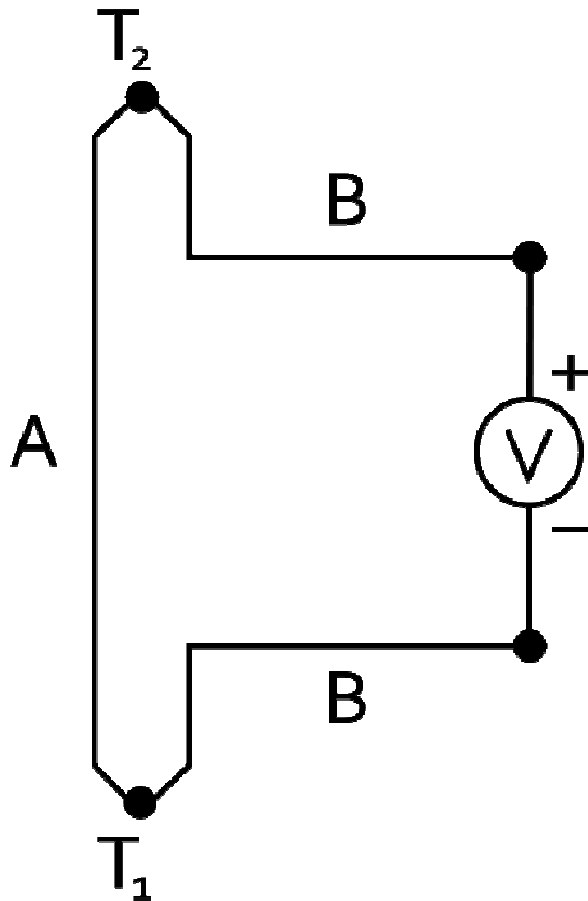
```
plot 'VAchar.dat' using 1:(abs($2)) title 'VA char' w lp 1 1
```

```
pause -1
```


7. Termoelektrické napětí v polovodiči

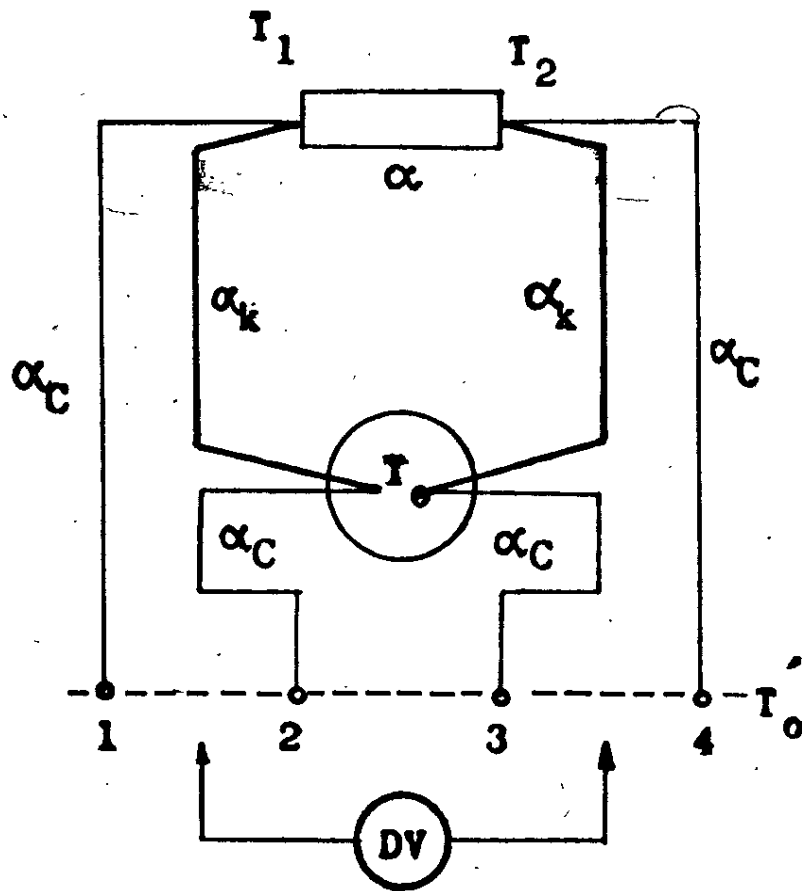
Seebackova konstanta:

$$\overline{E}^{\alpha} = \alpha \cdot \text{grad } T$$



- termoelektrické napětí je způsobeno především difuzí, popř. změnou koncentrace nositelů s teplotou
- Seebackova konstanta je záporná (kladná) pro polovodič typu n (p).

experimentální schéma



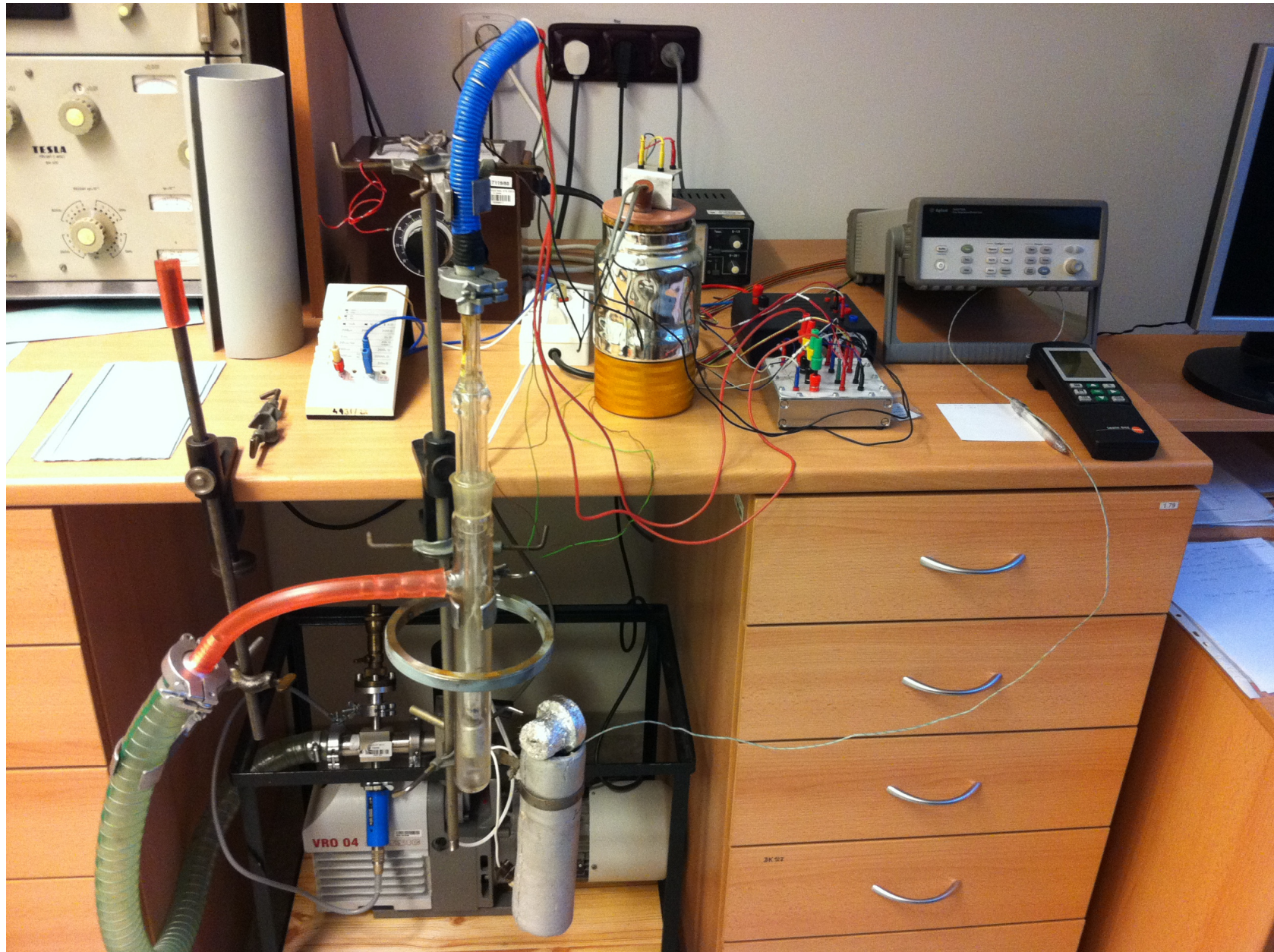
$$\alpha(T) = \frac{U_{14}(T)}{T_1 - T_2} + \alpha_C(T)$$

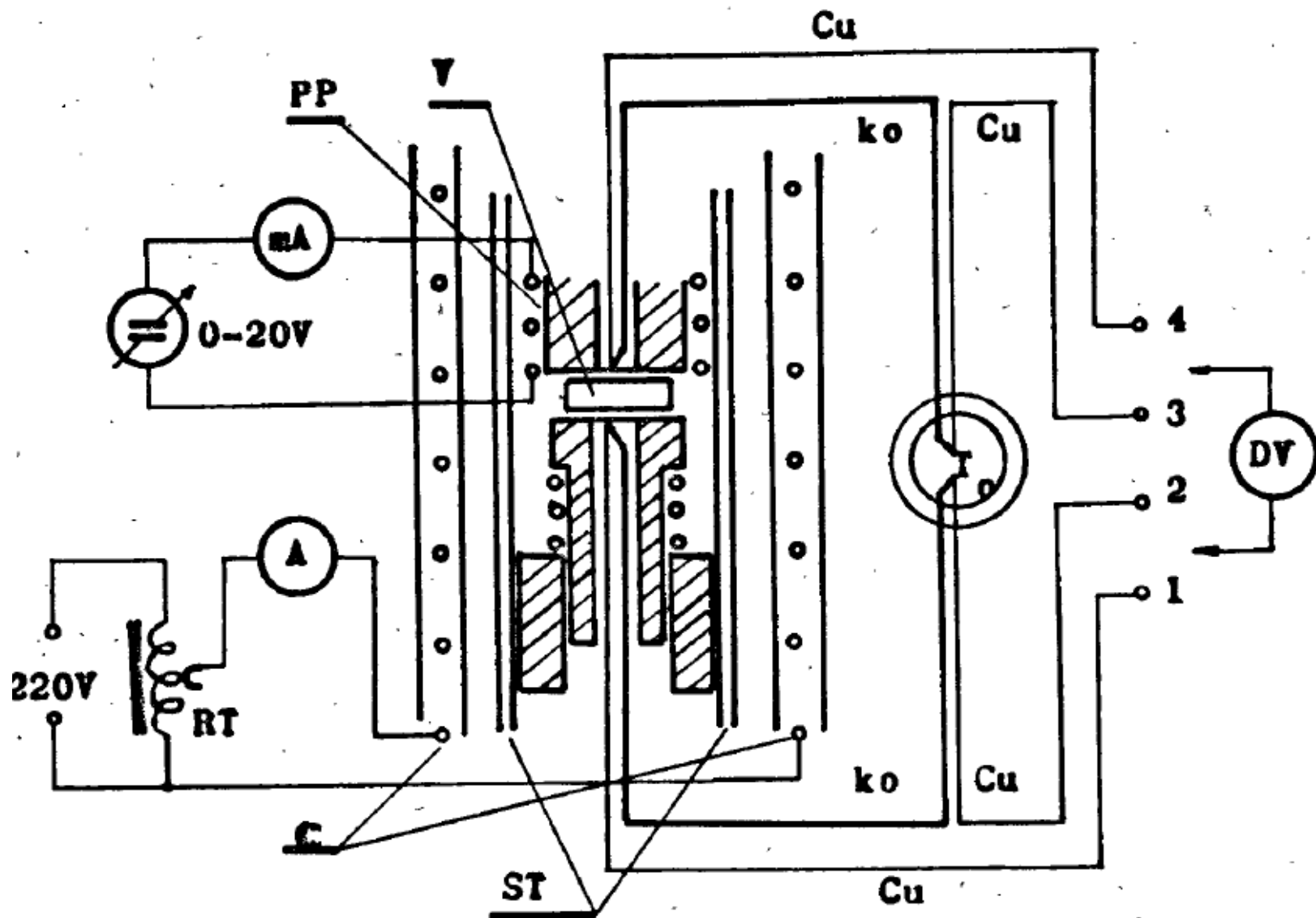
$$\alpha(T) = \frac{U_{23}(T)}{T_1 - T_2} + \alpha_K(T)$$

$$\alpha(T) = \frac{U_{14}(T)}{U_{23} - U_{14}} (\alpha_C(T) - \alpha_K(T)) + \alpha_K(T)$$

- potřebujeme znát termoelektrické napětí přívodních kabelů α_C , α_K .
- měření je tedy relativní vůči těmto přívodům

- měření v rozsahu teplot 80-600 K
- chlazení kapalným dusíkem, vyhřívání externí pískou





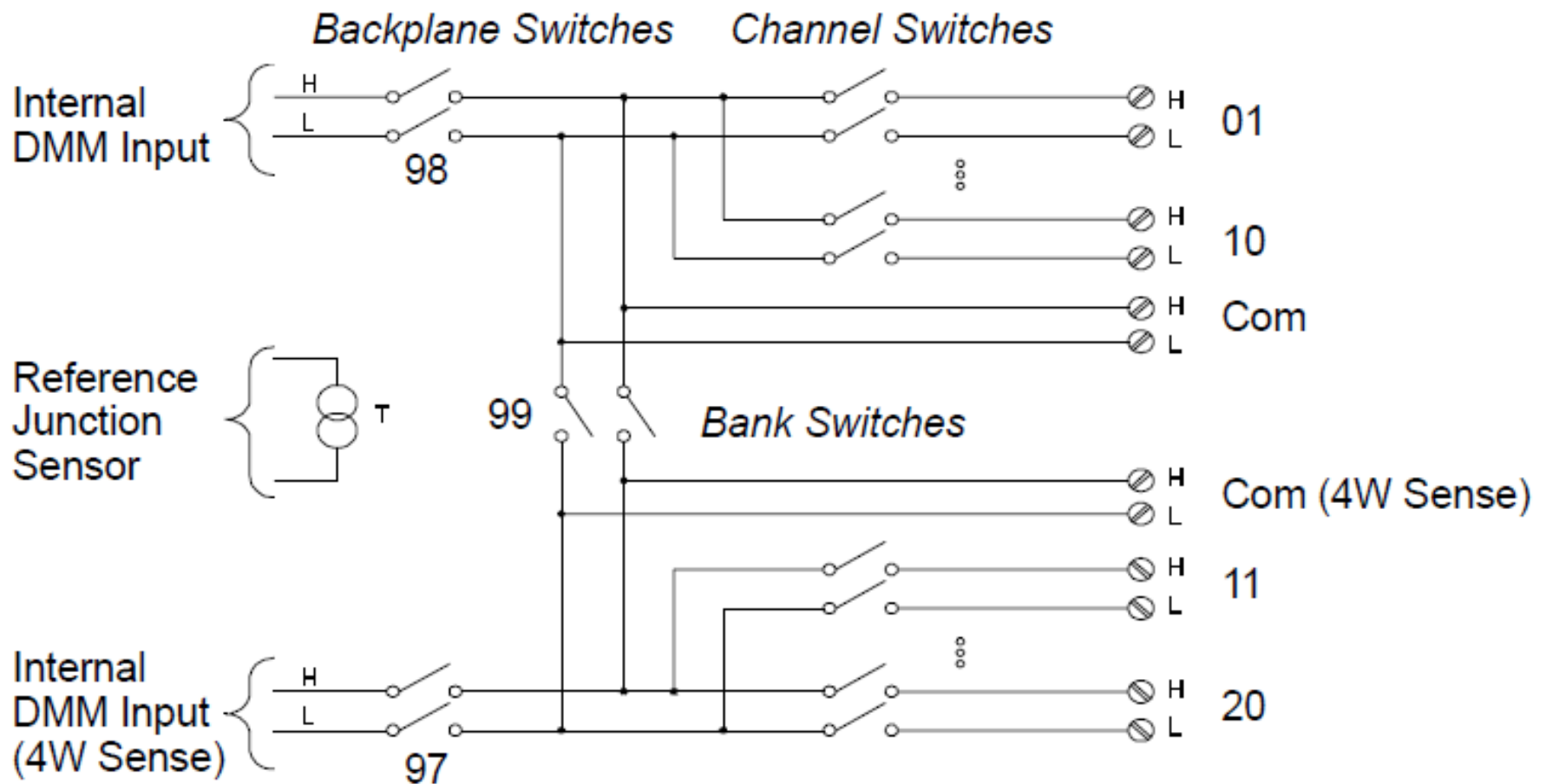
Obr.4.2. Aparatura pro měření teplotní závislosti Seebackovy konstanty polovodiče v rozmezí teplot od 300 do 550 K.

- měření napětí a teplot pomocí multimetru Agilent 34970A



20 kanálový multiplexer 34901A

- 20 kanálový multiplexer rozdělený do dvou sad po 10 kanálech 01-10 a 11-20
- na každém kanálu je možno měřit napětí, případně přívěz vstup z teplotní sondy
- 4 bodová měření se vždy provádí na párech n+10



20 kanálový multiplexer 34901A

	34901A	34902A	34908A
Number of channels	20 + 2	16	40
Max scan speed	60 ch/s	250 ch/s	60 ch/s
Number of contacts	2 or 4	2 or 4	1
Temperature			
Thermocouple	●	●	●
2-wire RTD	●	●	●
4-wire RTD	●	●	
Thermistor	●	●	●
dc Volts	●	●	●
ac Volts	●	●	●
2-wire Ohms	●	●	●
4-wire Ohms	●	●	
Frequency	●	●	●
Period	●	●	●
dc current	●		
ac current	●		

programové vybavení

- skript Seebeck_measure_34970A.py v jazyku Python (J. Chaloupka)
- komunikace přes port RS 232

úvodní definice:

```
import time  
import serial
```

```
# send SCPI command (Standard Commands for Programmable Instruments  
def scpi(msg):  
    global ser  
    ser.write(msg+"\r\n")  
    return
```

```
# configure Agilent for the measurement
```

```
scpi("SYST:REM")
```

```
scpi("*RST")
```

```
time.sleep(1)
```

```
# channels 102,103 - junction Cu-Ko
```

```
scpi("CONF:TEMP TC,T,(@102,103)")
```

```
scpi("UNIT:TEMP K,(@102,103)")
```

```
# channel 101 - 4w RTD on Pt, paired to 111
```

```
scpi("CONF:TEMP FRRTD,85,(@101)")
```

```
scpi("UNIT:TEMP C,(@101)")
```

```
# use 101 as reference for 102,103
```

```
scpi("SENS:TEMP:TRAN:TC:RJUN:TYPE EXT,(@102,103)")
```

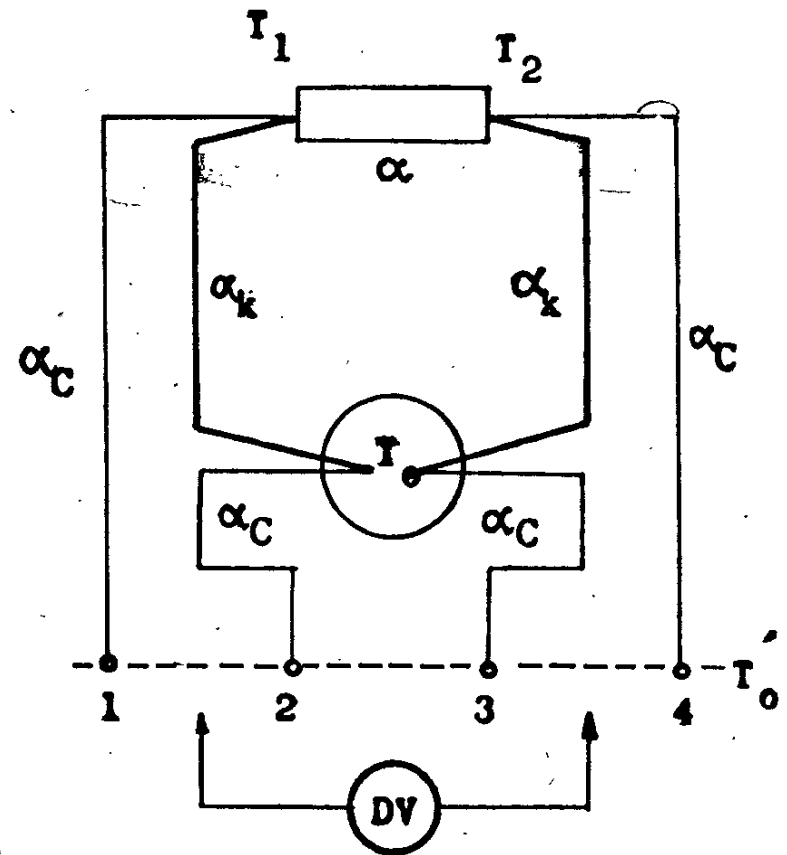
```
# channels 104,105 - DC voltage
```

```
scpi("CONF:VOLT:DC (@104,105)")
```

```
# channel 112 - resistance (compensated)
```

```
scpi("CONF:RES (@112)")
```

```
scpi("SENS:RES:OCOM ON,(@112)")
```




```
# what to scan
scpi("ROUTE:SCAN (@101,102,103,104,105,112)")

# initialize scan
scpi("INIT")

print "Initialization of channels O.K."

time.sleep(2) # it has to wait here for >= 2 seconds, otherwise gives error 222

# read data
print "Reading data"
scpi("DATA:REMOVE? 6") #reads the 6 readings and erase them from memory
meastr=ser.readline()

print "Scan performed"

# end remote control
scpi("ROUT:MON:STAT ON")
scpi("SYST:LOC")

return meastr
```

ze Seebeckova koeficientu lze určit vzdálenost Fermiho meze od valenčního (vodivostního) pásu. Pro p-dopovaný polovodič

$$\alpha_p = \frac{k}{m} \left[\left(\frac{5}{2} + s \right) - \frac{E'_F}{kT} \right]$$

pro smíšený polovodič který obsahuje elektrony i díry je

$$\alpha = \frac{\alpha_p \cdot \sigma_p - |\alpha_n| \cdot \sigma_n}{\sigma_n + \sigma_p}$$

kde $\sigma_n = q \cdot n \cdot \mu_n$ a $\sigma_p = q \cdot p \cdot \mu_p$

jsou měrné vodivosti elektronů a děr

jelikož typicky $\sigma_n > \sigma_p$ nastává při zvyšování teploty a přechodu polovodiče typu p z oblasti příměsově do oblasti vlastní vodivosti při určité teplotě změna znaménka termosíly.

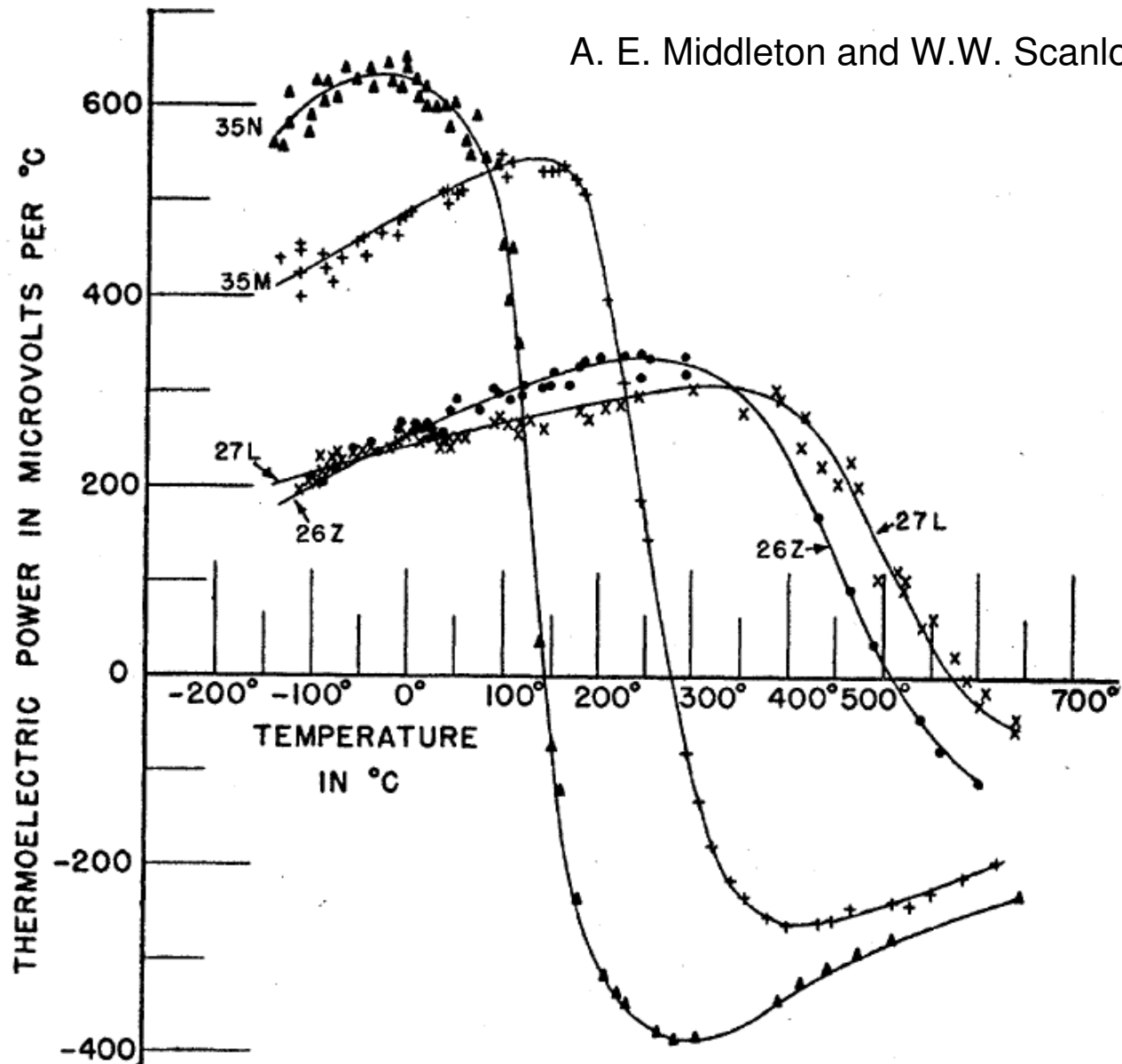
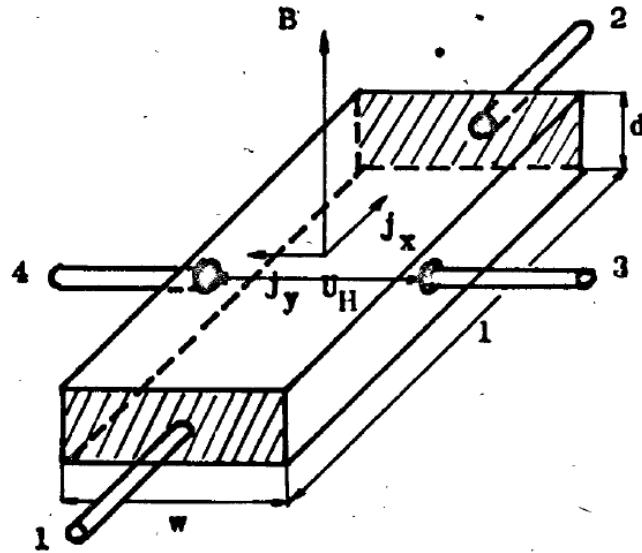


FIG. 5. Thermoelectric power curves for four polycrystalline, aluminum-doped germanium samples. The number of holes per cm^3 , at exhaustion, is 5.6×10^{15} for sample 35N, 1.5×10^{17} for 35M, 4.1×10^{18} for 26Z, and 7.0×10^{18} for 27L.

rámcový časový průběh měření

- první půl den:
 - propojení aparatury
 - očištění vzorku (lih, aceton)
 - vložení vzorku do kryostatu a provedení testování a měření na pokojové teplotě
- druhý půl den:
 - vyčerpání
 - chlazení kryostatu kapalným dusíkem (~30-60 minut)
 - sejmutí nádoby s kapalným dusíkem
 - měření samovolným ohříváním
 - instalace pícky (okolo 200 K) a pokračování do ~ 550 K
 - doba celkem ~ 4-5 hodin

3. Elektrická vodivost, Hallův koeficient a magnetovodivost polovodiče.



Hallův koeficient $R_H = \frac{U_H \cdot d}{B \cdot I}$

Z halova koeficientu můžeme získat koncentraci nositelů:

$$R_H = - \frac{1}{q \cdot n}$$

v případě, že všichni nositelé mají stejné vlastnosti.
Toto je dobrá aproximace např. pro kovy.

pokud měříme měrný odpor, získáme také pohyblivost

$$\sigma_n = q \cdot n \cdot \mu_n$$

$$\sigma_p = q \cdot p \cdot \mu_p$$

Halův faktor r_H

v případě, že nosiče mají určité rozdělení, pak lze odvodit že
(např. Yu-Cardona, Physics of semiconductors, nebo L. Hrivnák a kol, Teória tuhých látok, 1985
)

$$R_H = - r_H \cdot \frac{1}{q \cdot n}$$

kde $r_H = \frac{\langle \tau^2 \rangle}{\langle \tau \rangle^2}$

je Hallův faktor. τ je střední doba rozptylu

$$R_H = + r_H \cdot \frac{1}{q \cdot p}$$

$$r_H = 3\pi/8 \quad \text{pouze Si, n-tyt}$$

Hallův faktor je blízký k 1, ale v rozmezí 0.2-4, navíc tím že rozdělovací funkce je teplotně závislá. Z Hallova měření tedy získáváme koncentraci příp. mobilitu až na snalost Hallova faktoru. Hovoříme tedy o Hallově pohyblivosti a Hallově koncentraci.

Halův faktor v Ge

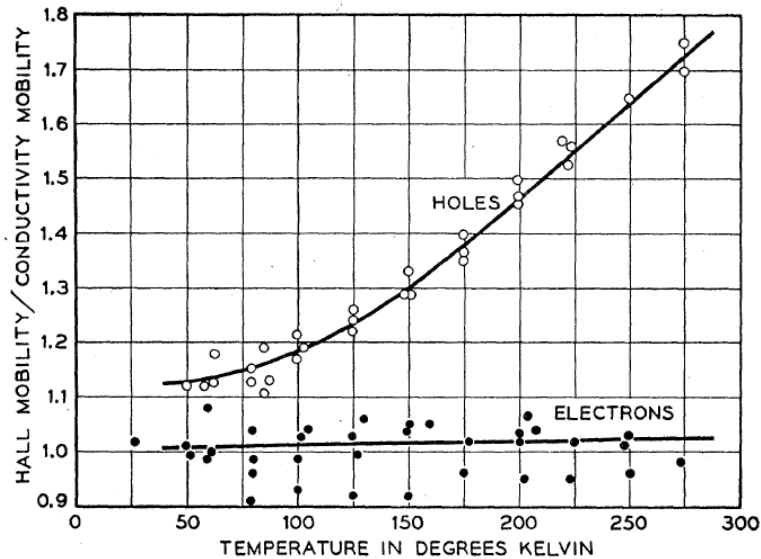
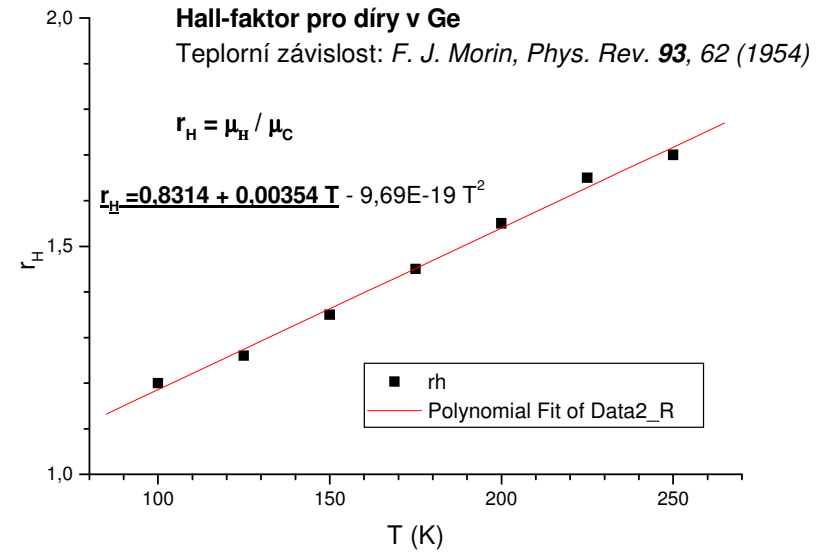


FIG. 2. Hall mobility/conductivity mobility as a function of temperature.

¹ F. J. Morin, Phys. Rev. 93, 62 (1954).



- podíl Hallovy pohyblivosti a pohyblivosti určené z vodivosti za předpokladu konstantní koncentrace nositelů

Pro elektrony je Hall-faktor téměř nezávislý na teplotě (100 – 300 K) : $r_H = 3\pi/8 = 1,18$

Pro díry Hall-faktor roste lineárně s teplotou (100 – 300 K) pro $T = 300\text{ K}$ je $r_H = 1,89$

Halův faktor v Si

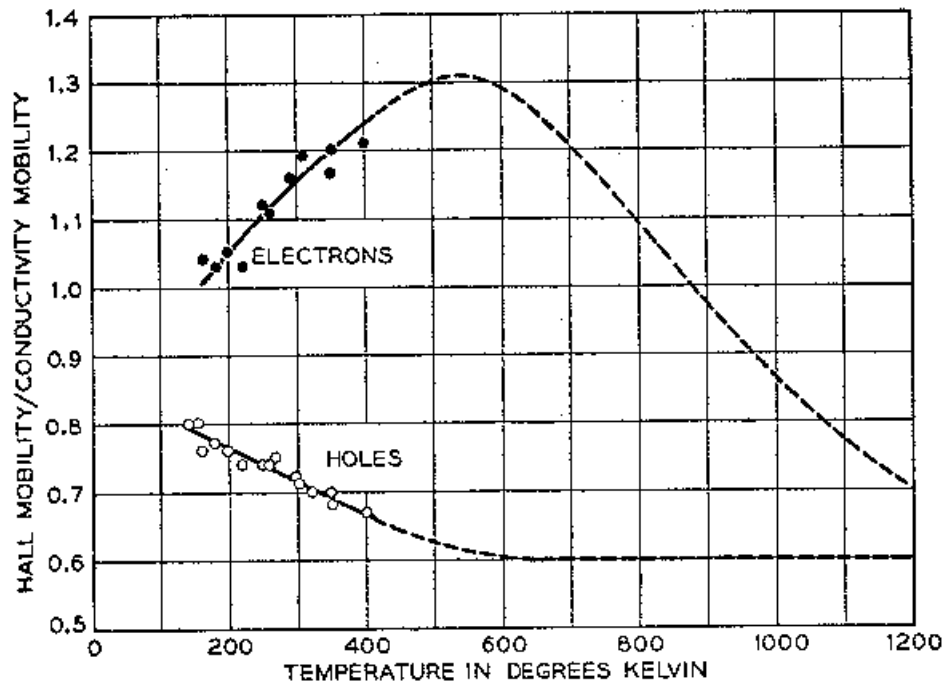


FIG. 14. Hall mobility/conductivity mobility as a function of absolute temperature for electrons and holes in silicon.

Teplotní závislost koncentrace vlastních nositelů

$$n = N_C \exp \left\{ (E_F - E_C) / kT \right\} \quad N_C = 2 \cdot (2\pi m_n \cdot k \cdot T \cdot h^{-2})^{3/2}$$

$$p = N_V \exp \left\{ (E_V - E_F) / kT \right\} \quad N_V = 2 (2\pi m_p \cdot k \cdot T \cdot h^{-2})^{3/2}$$

$$n \cdot p = n_i^2(E_g, T) = N_C N_V \exp(-E_g / kT)$$

n_i je intrinsická koncentrace, při $T = 300$ K je pro

Ge: $n_i = 2.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ (šířka zakázaného pásu 0.67 eV)

Si: $n_i = 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ (šířka zakázaného pásu 1.11 eV)

přibližně (pro $\mu_n / \mu_p = \text{konst}$) $R_H(T) = \text{konst.} \cdot T^{-3/2} \exp[E_g / 2kT]$

z naměření teplotní závislosti R_H v oblasti vlastní vodivosti lze určit E_g

Hallova konstanta a vodivost pro dvojí typ nositelů

$$R_H = -r_H \frac{n \cdot \mu_n^2 - p \cdot \mu_p^2}{q(n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)^2}$$

$$\sigma = q \cdot n \cdot \mu_n + q \cdot p \cdot \mu_p$$

$$r_H = \frac{\langle \tau^2 \rangle}{\langle \tau \rangle^2}$$

pro dopování např. donory je podmínka nábojové neutrality: $n - N_D = p$
z ní lze odvodit že

$$n = \frac{N_D}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_D}{2}\right)^2 + n_i^2(T)}$$

$$p = \frac{n_i^2}{n}$$

- experimentálně zjištěná pohyblivost pro Ge

elektrony: $\mu_L = 4,9 \cdot 10^7 \cdot T^{-1,66} \text{ cm}^2/\text{Vs}$

díry: $\mu_L = 1,05 \cdot 10^9 \cdot T^{-2,33} \text{ cm}^2/\text{Vs}$

koncentrace příměsí

- koncentraci příměsí N_D lze určit v oblasti příměšové vodivosti kdy $n_i \ll N_D$ a Hallův koeficient by měl být konstantní nebo
- fitováním teplotní závislosti předcházející sadou rovnic

Magnetorezistance

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = \xi \cdot (\mu_H \cdot B)^2$$

pro rozptyl na akustických fononech $x=0.275$

pro částečné zkratování hallova pole je navíc magnetorezistance násobená koeficientem $k < 1$

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = k \cdot (\mu \cdot B)^2$$

k závisí na poměru délky a šířky vzorku

- principiálně je možno magnetorezistanci použít na určení pohyblivosti μ , avšak reálně koeficient k komplikuje kvantitativní zpracování
- relativně slabý efekt $\sim 1\%$. Pro větší efekty je třeba použít spintroniku, viz gigantická magnetoresistance, nobelova cena 2007

Teplotní závislost pohyblivosti

- pohyblivost je dána rozptylovými procesy a efektivní hmotností

$$\mu = \frac{q}{m^*} \langle \tau \rangle$$

- rozptylové procesy jsou zásadní pro elektroniku (HEMT - high electron mobility transistor)

- měřitelná pomocí Hallova jevu a měření vodivosti

$$\mu_H(T) = |R_H(T) \cdot \sigma(T)|$$

- experimentálně zjištěná závislost pro Ge

elektrony: $\mu_L = 4,9 \cdot 10^7 \cdot T^{-1,66} \text{ cm}^2/\text{Vs}$

díry: $\mu_L = 1,05 \cdot 10^9 \cdot T^{-2,33} \text{ cm}^2/\text{Vs}$

Experimentální vybavení

dusíkový kryostat, 80-500K

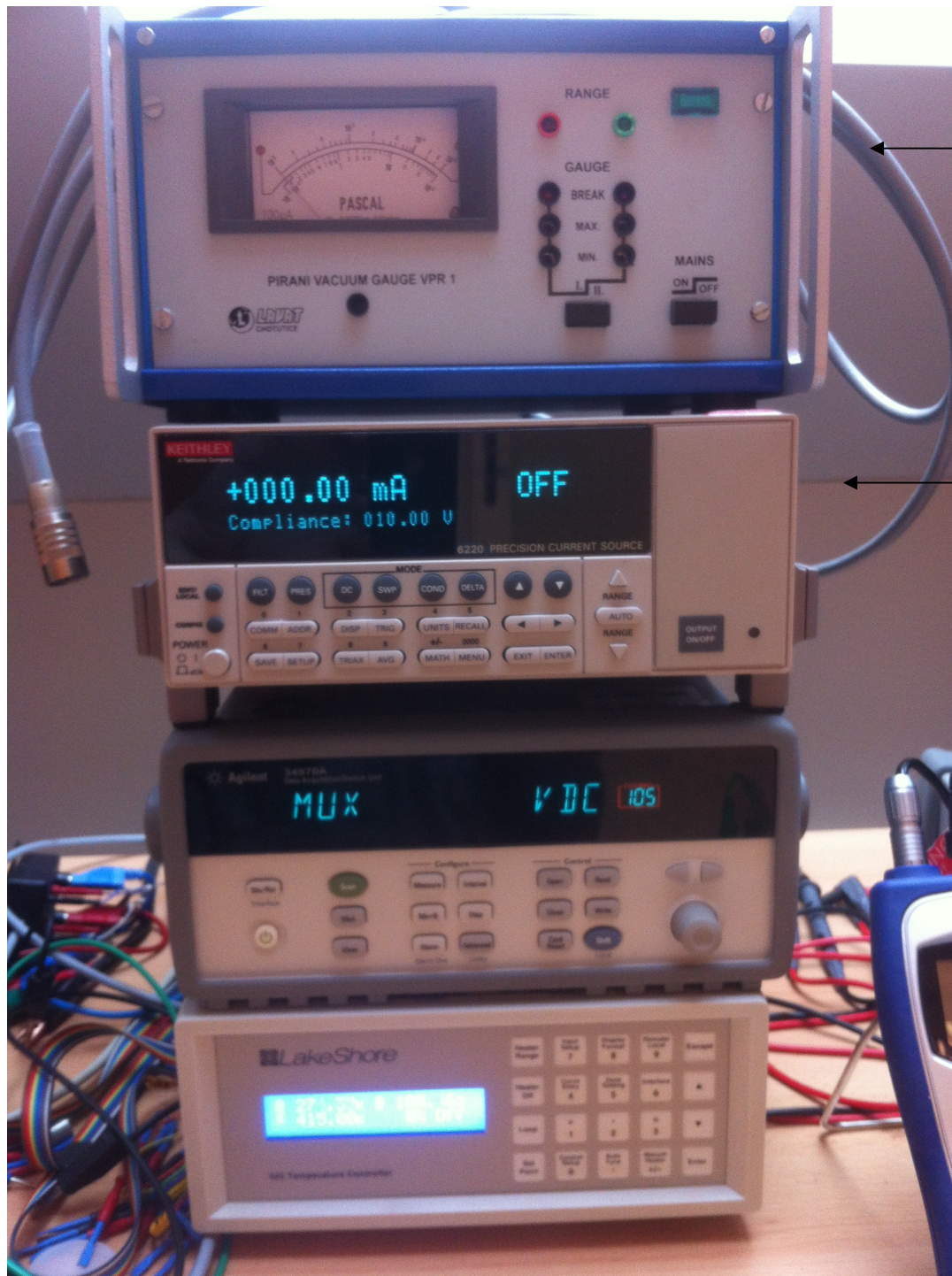
magnet, ~1T

zdroj pro magnet



měřicí elektronika

- kontaktování vzorku
 - Ge můžeme pájet
 - u jiných materiálů můžeme použít stříbrnou pastu
- vzorek v kryostatu chlazený kapalným dusíkem, rozsah teplot 80-300 K
- resistivní magnet, magnetická pole principiálně až 2 T



← měření tlaku

← přesný zdroj konstantního proudu
Keithley 6220



- přesný zdroj konstantního proudu Keithley 6220

šum 4-5 řádů

6220 Programmable Current Source

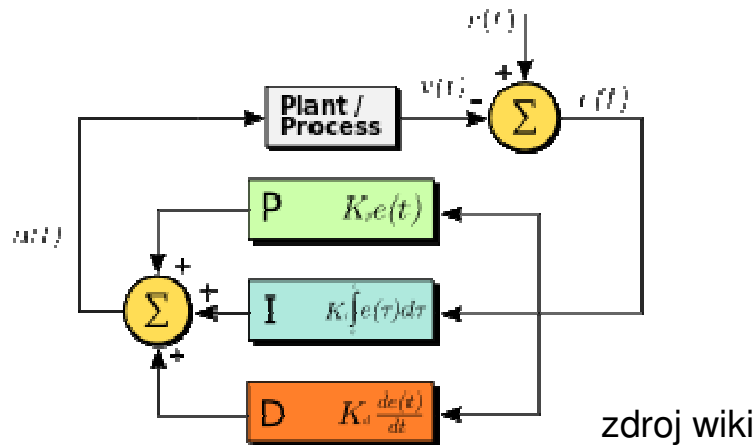
SOURCE SPECIFICATIONS

Range (+5% over range)	Accuracy (1 Year) 23°C±5°C ±(%rdg. + amps)	Programming Resolution	Temperature Coefficient/°C 0°-18°C & 28°-50°C	Typical Noise (peak-peak) /RMS ^{3,4,5} 0.1Hz-10Hz	Settling Time ^{1,2} (1% of final value)
2nA	0.4% + 2pA	100fA	0.02% + 200fA	400/80fA	100μs
20nA	0.3% + 10pA	1pA	0.02% + 200fA	4/0.8pA	100μs
200nA	0.3% + 100pA	10pA	0.02% + 2pA	20/4pA	100μs
2μA	0.1% + 1nA	100pA	0.01% + 20pA	200/40pA	100μs
20μA	0.05% + 10nA	1nA	0.005% + 200pA	2/0.4nA	100μs
200μA	0.05% + 100nA	10nA	0.005% + 2nA	20/4nA	100μs
2mA	0.05% + 1μA	100nA	0.005% + 20nA	200/40nA	100μs
20mA	0.05% + 10μA	1μA	0.005% + 200nA	2/0.4μA	100μs
100mA	0.1% + 50μA	10μA	0.01% + 2μA	10/2μA	100μs

teplotní kontroler Lakeshore 325

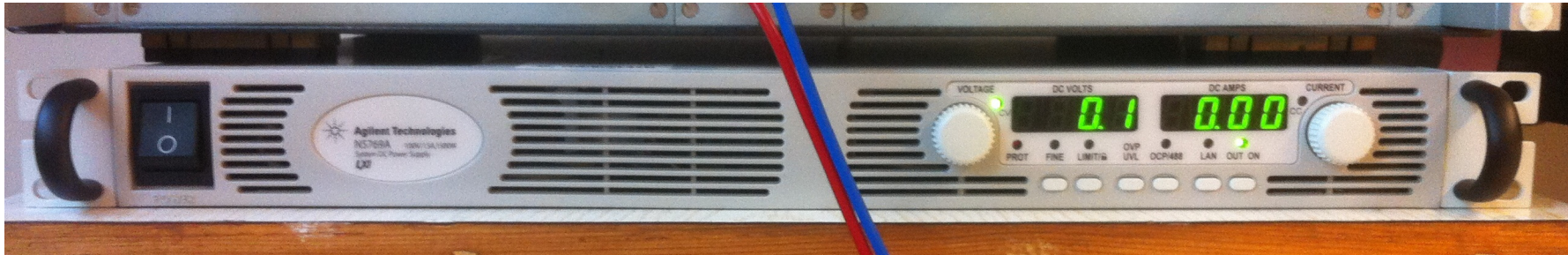


- měří teplotu, v našem případě Pt sondou
- reguluje proud topením (50 Ω cartridge heater) tak aby se teplota co nejvíc přiblížila požadované teplotě (setpoint)
- stabilizační cyklus se zpětnou vazbou nastavitelný pomocí hodnot P,I,D
 - P proporční příspěvek, určený současnou chybou
 - I integrální příspěvek, určený minulými chybami
 - D diferenční příspěvek, určený odhadem budoucích chyb

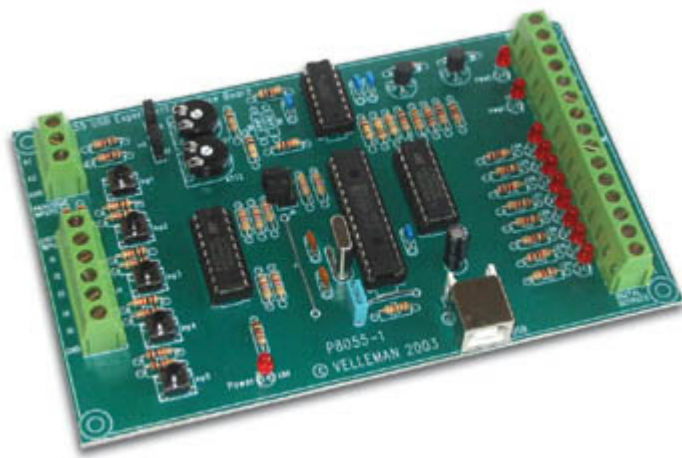


- správné nastavení PID hodnot řádově ovlivňuje rychlost stabilizace
- závisí na typu aparatury (výkon topítka, velikost topné oblasti atp.)
- závisí i na teplotě, např. je veliký rozdíl mezi 4K a 300K, pak se používá zone PID

zdroj proudu pro magnet, Agilent N5769A



- zdroj stejnosměrného proudu 100V, 15A, výkon 1500 W
- řízený přes USB via VISA
- pouze proudy „jedním směrem“ (unipolární zdroj), vlastnost drtivé většiny zdrojů. Bipolární zdroje existují (firma Kepko), ale jsou řádově dražší a méně výkonné.
- nutnost doděláné komutace proudu pro změny magnetického pole přes relé
- ovládání relé přes Vellemanovu kartu



karta Velleman K8055

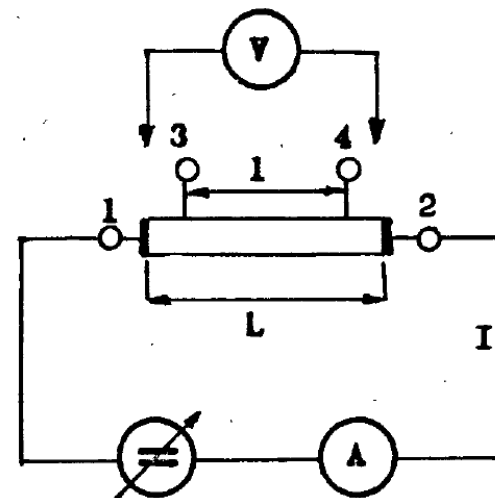
- karta pro digitální a analogový výstup/vstup z počítače
- velmi levná (1500 Kč)
- použita pro ovládání relé pro komutaci proudu magnetem
- ovládaná a napájená přes USB
- řízená příkazy z K8055D.dll

Specifikace:

- 5 digital inputs (0= ground, 1= open) (on board test buttons provided)
- 2 analog inputs with attenuation and amplification option (internal test +5V provided)
- 8 digital open collector output switches (max. 50V/100mA) (on board LED indication)
- 2 analog outputs:
 - 0 to 5V, output resistance 1K5
 - PWM 0 to 100% open collector outputs max 100mA / 40V (on board LED indication)
- general conversion time: 20ms per command
- power supply through USB: approx. 70mA

Měření měrného odporu

- často nazývané „transportní měření“
- měření dvoukontaktní metodou
- měření čtyřkontaktní metodou
- metoda van der Paw



Měření dvoukontaktní metodou

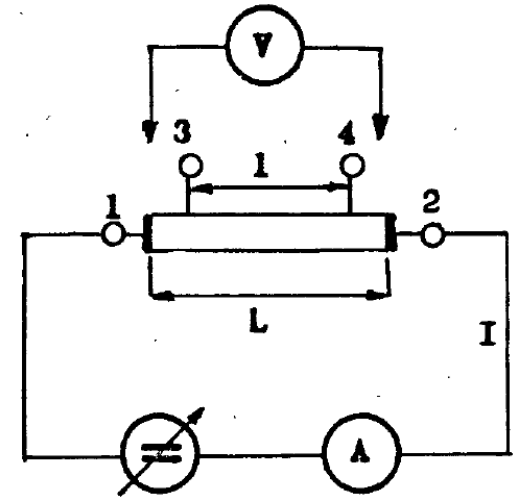
$$\rho = \frac{U_{12}}{I} \frac{S}{L}$$

- nejjednodušší měření „ohmmetrem“
- výsledek zatížený chybou odporu přívodních drátů a hlavně přechodového odporu kontaktů

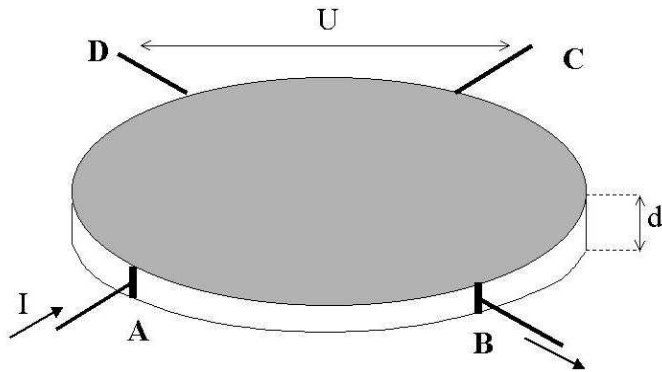
Měření čtyřkontaktní metodou

$$\rho = \frac{U_{34}}{I} \frac{S}{l}$$

- ke vzorku musí vézt čtyři vodiče
- napěťovými kontakty neteče žádný (nebo minimální) proud, tedy úbytek na přechodovém odporu není.
- pro vyloučení termoelektrického jevu provádíme dvě měření s komutací proudu
- velmi častá metoda u podélných vzorků tvaru hranolu



Měření metodou van der Pauw



- měření na deskách **libovolného** tvaru
- jsou provedena dvě měření R_1 a R_2 s proudovými kontakty A-B a podruhé „otočenými o 90 stupňů“, tzn. B-C.

$$R_1 = \frac{U_{CD}}{I_{AB}} \quad R_2 = \frac{U_{DA}}{I_{BC}}$$

- z těchto dvou měření se určí plošný odpor R_s řešením transcendentní rovnice

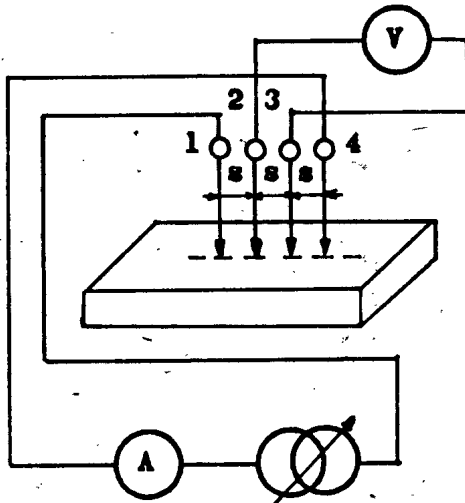
$$e^{-\pi R_1 / R_s} + e^{-\pi R_2 / R_s} = 1$$

- měrný odpor pak $\rho = d R_s$

aproximativně platí:

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \frac{(R_1 + R_2)}{2} f\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \quad f\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \cong 1 - \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2}\right)^2 \frac{\ln 2}{2} - \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2}\right)^4 \left[\frac{(\ln 2)^2}{4} - \frac{(\ln 2)^3}{12} \right]$$

Měření odporu čtyřsondou



- čtyři hrotové kontakty uspořádané lineárně za sebou s pevnou vzdáleností kontaktů s
- kontakt se vzorkem pouze přiložením
- je-li vzorek polonekonečný (mnohem větší a tlutší než vzdálenost hotů, pak měrný odpor je

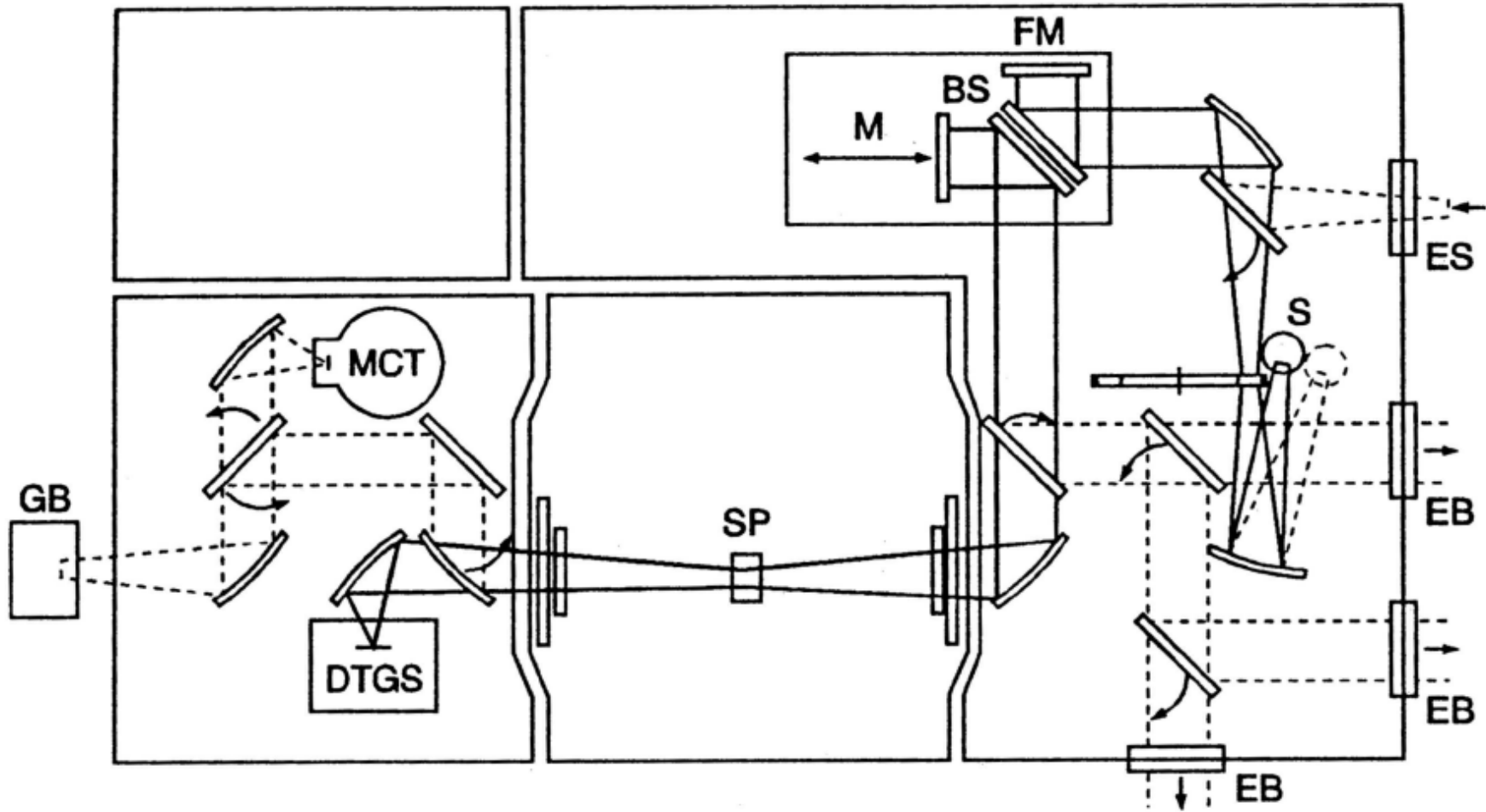
$$\rho = 2\pi s \frac{U}{I}$$

- pro rozměry srovnatelné s velikostí s je nutno hodnotu numericky korigova

kontaktování vzorku

- pájení (kovy, ale také i germánium), pouze do 130 °C
- lepení vodivými lepidly (stříbrná pasta, vodivé epoxy): oxidové materiály
- napařování zlatých kontaktů
- pozor na oxidové vrstvy, např. u Si (vtírání kontaktu skrz oxidovou vrstvu)
- wire bonding – metoda na kontaktování (svařování) měděných, zlatých, hliníkových drátů s rozměry až ~10 μm (CEITEC).

8. Infračervená spektroskopie pevných látek



- Fourierovský spektrometr (Bruker IFS 66v)
- spektrální informace určena interferometricky – měření pásma frekvencí najednou

předpokládejme že zdroj emituje monochromatickou vlnu:

$$E(r, t) = E_0 \cos(k_0 r - \omega_0 t)$$

detektor: $E_D(r, t) = \frac{E_0}{2} \{ \cos(k_0 r_D - \omega_0 t) + \cos[k_0(r_D + 2x) - \omega_0 t] \}$

detektor: $I(x) = \text{konst } \epsilon_0 \langle E^2 \rangle = \text{konst } \frac{\epsilon_0}{4} E_0^2 [1 + \cos(4\pi\nu_0 x)]$

vlnočet: $\nu_0 = k_0 / 2\pi$

při polychromatickém zdroji s intenzitou $I(\nu)$ je intenzita na detektoru

$$I(x) = \frac{1}{2} \int_0^\infty I(\nu) [1 + \cos(4\pi\nu x)] d\nu$$

střední intenzita : $I'(x) = I(x) - \frac{1}{2} \int_0^\infty I(\nu) d\nu = \frac{1}{2} \int_0^\infty I(\nu) \cos(4\pi\nu x) d\nu$

spektrální informaci získáme inverzní Fourierovou transformací přímo měřené veličiny $I'(x)$

$$I(\nu) = 2 \int I'(x) \cos(4\pi\nu x) dx$$

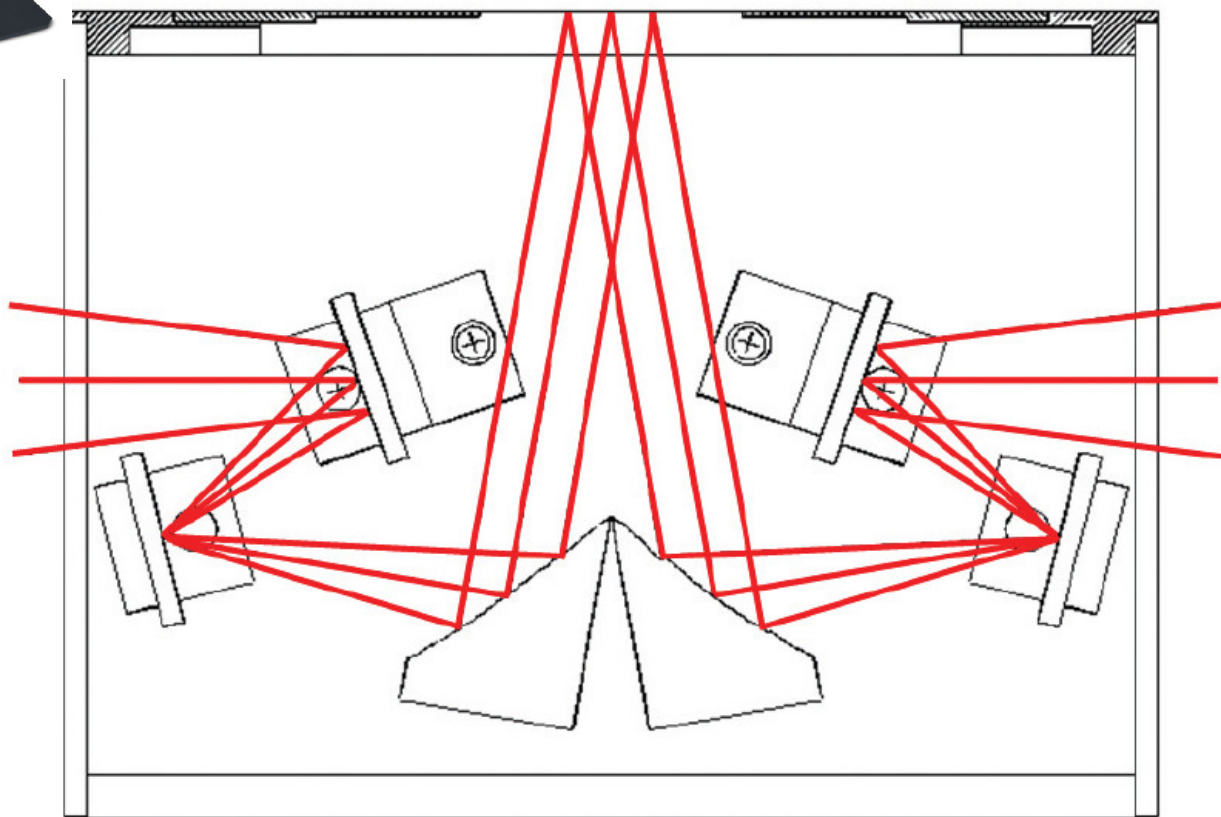


- Fourierovský spektrometr
Bruker IFS 66v

- zdroj globar (glow bar – žhavená keramická tyč)
- detektor DTGS (deuterated tri glycin sulfat), blízkost k feroelektrickému přechodu
- rozsah frekvencí $50\text{-}680\text{ cm}^{-1}$ (6-90 meV), FIR (far infrared), dělič svazku $6\text{ }\mu\text{m}$ mylar
- rozsah frekvencí $400\text{-}6000\text{ cm}^{-1}$ (50- 750 meV), MIR (mid infrared), dělič svazku KBr krystal
- měření pod vakuem pro odstranění absorpce ve vzduchu



- Přístavek pro měření odrazivosti s úhlem dopadu 10°
- použití parabolických zrcadel



Beam path within the 10Spec – Specular Reflectance accessory

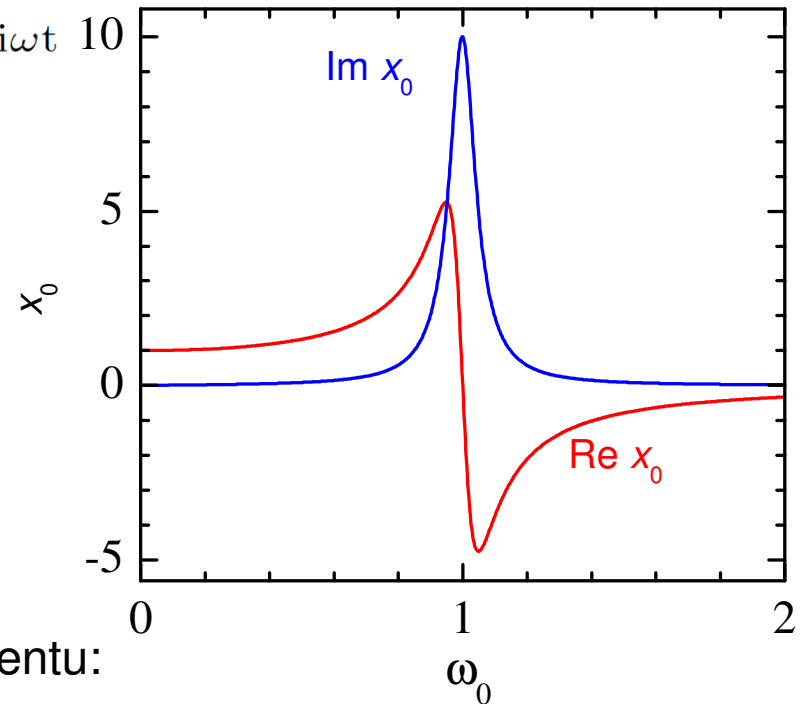
Lorentzův oscilátor

Newtonova rovnice harmonicky buzeného mechanického oscilátoru:

$$m \frac{dx(t)}{dt^2} = -k x(t) - m\gamma \frac{dx(t)}{dt} + qE_0 e^{-i\omega t}$$

Řešení:
$$x_0(\omega) = \frac{F}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad F = \frac{qE_0}{m}$$



Polarizace: prostorová hustota dipólového momentu:

$$P(\omega) = \sum_i nq x_{0,i}(\omega), \quad \epsilon(\omega) = 1 + \frac{P(\omega)}{E(\omega)}$$

$$N(\omega) = \sqrt{\epsilon(\omega)}, \quad R = \left| \frac{N - 1}{N + 1} \right|^2$$

Lorentzův oscilátor

$$\epsilon = \epsilon_{\infty} + \sum_k \frac{F_k}{\omega_k^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_k} \quad F = nQ^2/\epsilon_0 m$$

- Dielektrická funkce jako suma Lorentzových oscilátorů: Lorentzova formule

ϵ_{∞} je příspěvek vysokofrekvenčních procesů na nízké energii (limita Lorentzova oscilátoru pro nízké frekvence)

- Lorentzova formule velmi dobře popisuje odezvu vibrací iontů
- odezvu volných nosičů náboje získáme pro $\omega_0=0$

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} - \frac{F}{\omega(\omega + i\gamma)}$$

vztahu se říká Drudeova formule

- v obecnosti jsou příspěvky do dielektrické funkce aditivní, tedy se můžou sčítat různé oscilátory, Drudeův příspěvek atp.

Drudeova formule

- odezvu volných nosičů náboje získáme pro $\omega_0=0$

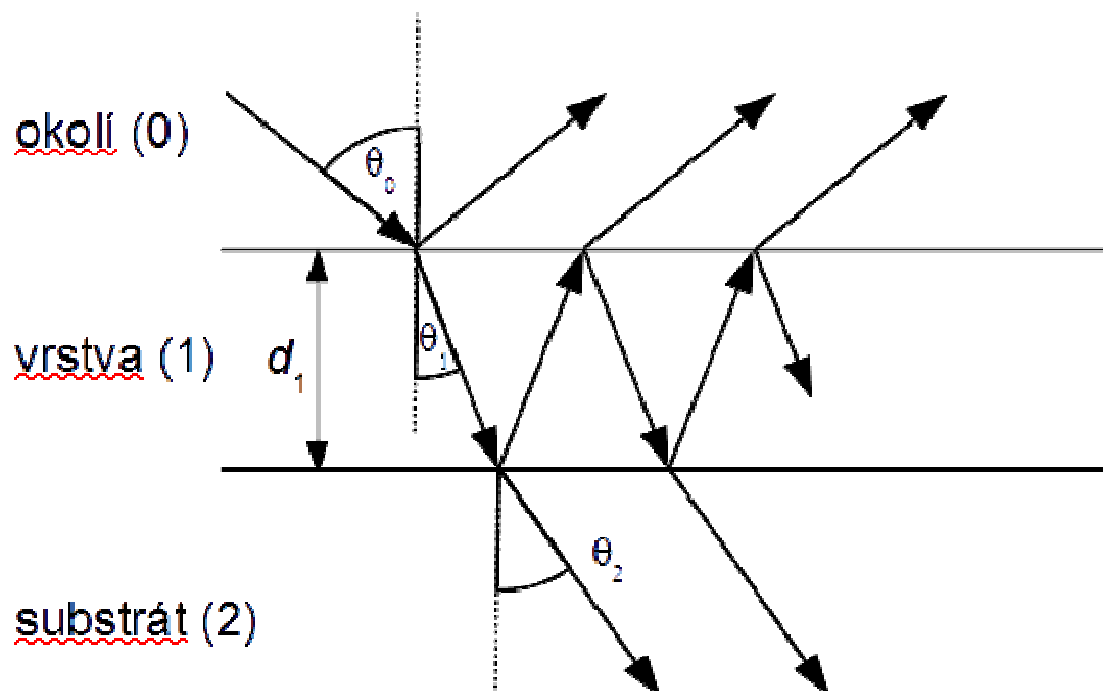
$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{F}{\omega(\omega + i\gamma)}$$

- vztahu se říká Drudeova formule a velmi dobře popisuje odezvu neinteragujících volných nositelů, např. dopovaného polovodiče nebo kovů
- v případě vodivých materiálů se často optická odezva vyjadřuje pomocí optické vodivosti

$$\sigma(\omega) = -i\omega\epsilon_0(\epsilon(\omega) - 1)$$

- reálná část optické vodivosti představuje hustotu absorpce záření, tzn. je to velmi fundamentální veličina.
- limita optické vodivosti do nulové frekvence představuje DC vodivost.
- v obecnosti jsou příspěvky do dielektrické funkce aditivní, tedy se můžou sčítat různé oscilátory, Drudeův příspěvek atp.

Interference na vrstvě



- výsledná vlna je dána součtem geometrické řady příspěvků
- amplitudy vlny polarizované v rovině dopadu (p) a kolmo (s) jsou následující:

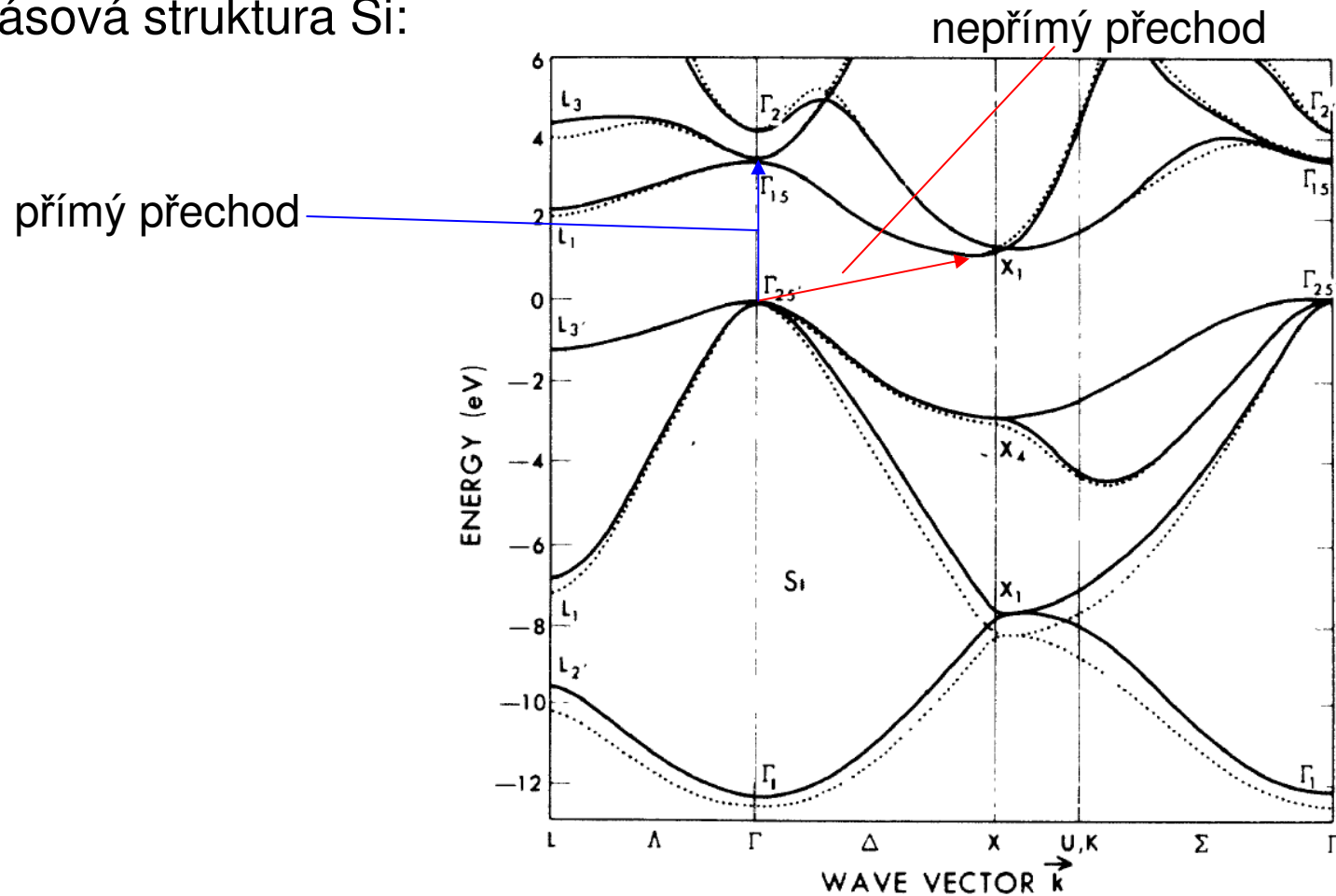
$$r_p^{\text{tot}} = \frac{r_{01p} + r_{12p} e^{i2\beta}}{1 + r_{01p} r_{12p} e^{i2\beta}}, \quad r_s^{\text{tot}} = \frac{r_{01s} + r_{12s} e^{i2\beta}}{1 + r_{01s} r_{12s} e^{i2\beta}}, \quad \beta = 2\pi \frac{d_1}{\lambda} N_1 \cos \theta_1$$

vzorky k měření

- jedno a dvoufononová absorpce v LiF
- odezva volných nositelů v dopovaném křemíku
- interference na vrstvě
- vysokoteplotní supravodič $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

5B) Absorpční hrana v polovodiči, mezipásové přechody a interference na tenké vrstvě, *F. Münz*

teoretická pásová struktura Si:



Cohen and Chelikowsky,
Solid-State Sciences 75,
Springer-Verlag 1988

FIG. 2. Band structure for Si as determined from a local-pseudopotential calculation (dotted line) and an energy-dependent nonlocal-pseudopotential calculation (solid line).

teoretická pásová struktura Ge:

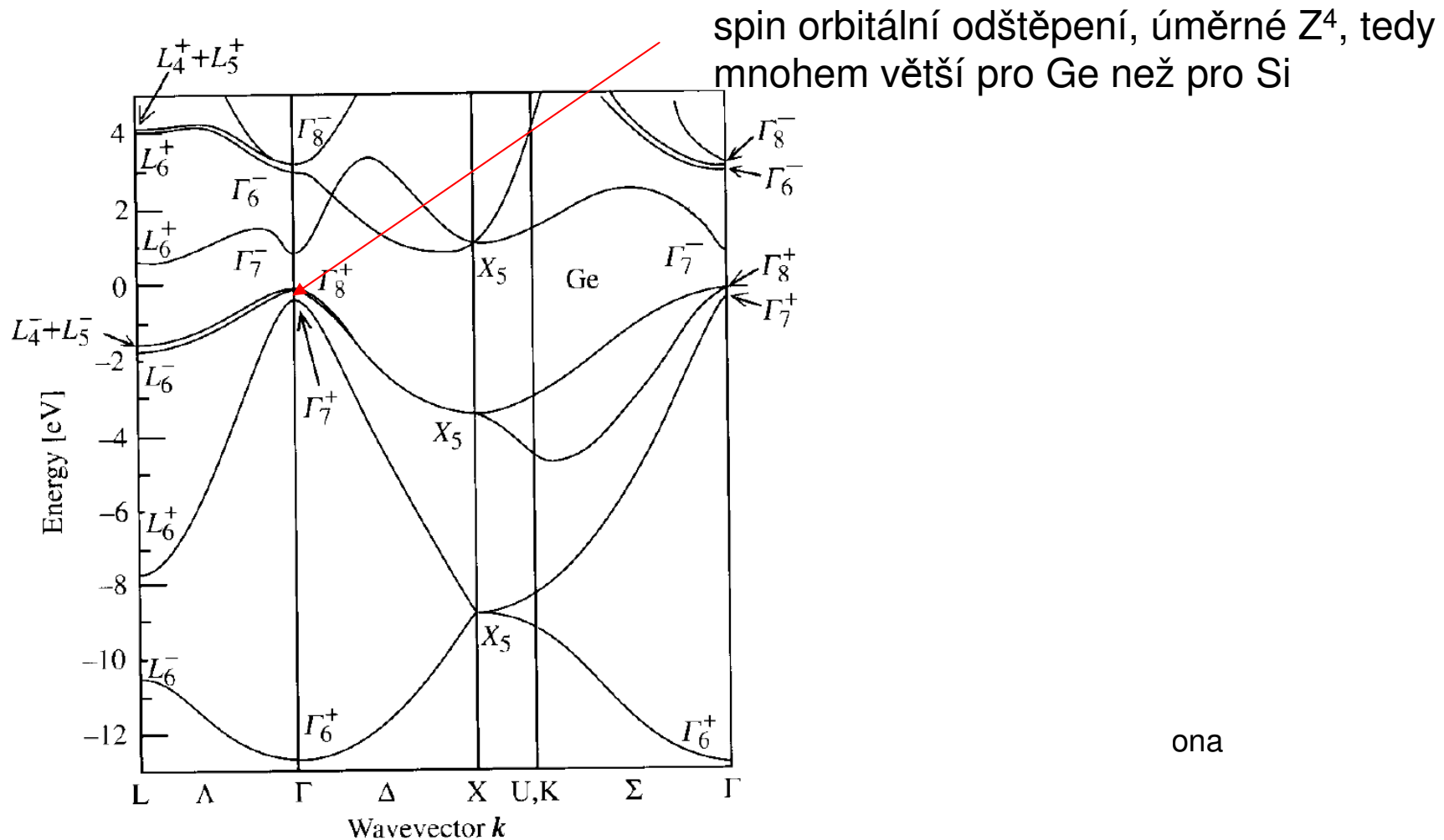


Fig. 2.13. Electronic band structure of Ge calculated by the pseudopotential technique. The energy at the top of the filled valence bands has been taken to be zero. Note that, unlike in Fig. 2.10, the double group symmetry notation is used [Ref. 2.6, p. 92]

Propagace elektromagnetické vlny

Postupná vlna: $E(x, t) = E_0 e^{-i(\omega t - kx)}$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

$$\lambda = vT = \frac{cT}{N(\omega)} = \frac{\lambda_0}{N(\omega)} \quad \lambda_0 \dots \text{vln. délka ve vakuu}$$

$$k = \frac{2\pi N(\omega)}{\lambda_0} = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n(\omega) + i\kappa(\omega))$$

$$E(x, t) = E_0 e^{-i(\omega t - \frac{2\pi n(\omega)}{\lambda_0} x)} e^{-\frac{2\pi}{\lambda_0} \kappa(\omega) x}$$

$$I(x, t) = |E(x, t)|^2 = I_0 e^{-\frac{4\pi}{\lambda_0} \kappa(\omega) x} = I_0 e^{-K x}$$

- Exponenciální pokles intenzity s koeficientem absorpce

$$K = \frac{4\pi}{\lambda_0} \kappa \quad \left(= \frac{\omega \epsilon_2(\omega)}{cn(\omega)} \right)$$

- nejedná se přesně řečeno o absorpci, a obsahuje i $n(\omega)$. Jedná se o exp. pokles. Např. při totální odraze intenzita exp. klesá, ale žádná energie se neabsorbuje.

„nejjednodušší“ experiment: propustnost

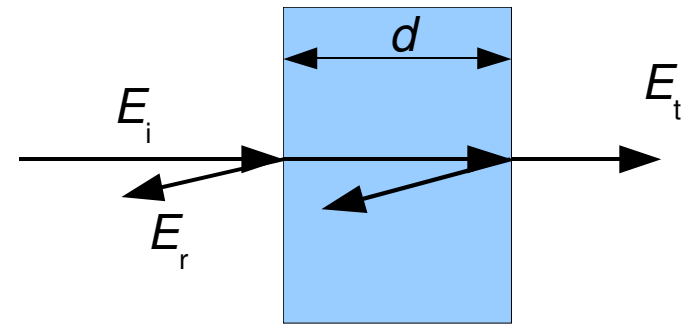
Propustnost:

Pokud se neuplatňují vícenásobné odrazy uvnitř vzorku, pak pro prošlou intenzitu platí

$$I_d = I_0(1 - R)^2 e^{-Kd}$$

exponenciální pokles se nazývá Beer-Lambertův zákon

- měření i velmi malých koeficientů absorpce na velkých tloušťkách



•závislost absorpčního koeficientu na energii pro různé typy mezipásových přechodů

přímý dovolený $K = A_1(E - E_g)^{1/2}$

přímý nedovolený $K = A_2(E - E_g)^{3/2}$

nepřímý dovolený $K = A_3(E - E_g \pm E_B)^2$

nepřímý nedovolený $K = A_4(E - E_g \pm E_B)^3$

odrazivost na tenkém vzorku $i_r = \frac{I_r}{I_0} = R \left[1 + \frac{(1 - R)^2 e^{-2Kd}}{1 - R^2 e^{-2Kd}} \right]$

propustnost na tenkém vzorku $i_d = \frac{I_d}{I_0} = \frac{(1 - R)^2 e^{-Kd}}{1 - R^2 e^{-2Kd}}$

Odrazivost na polonekonečném vzorku

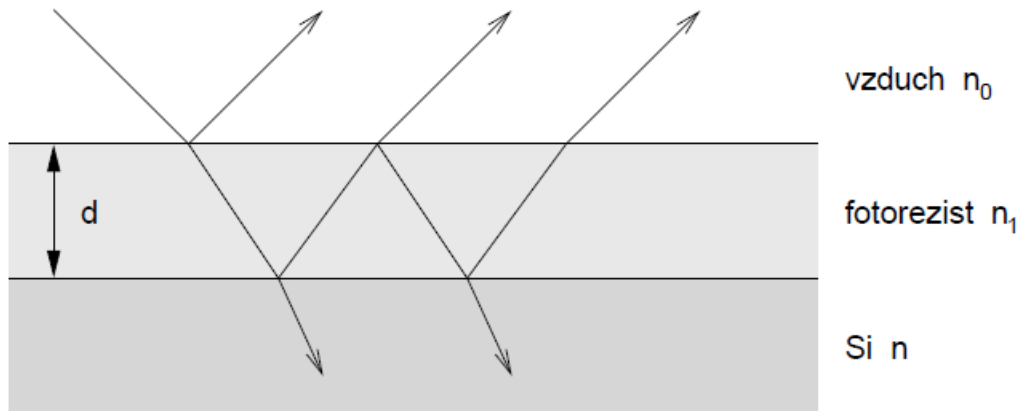
- polonekonečným vzorkem myslíme vzorek tlustší než hloubka průniku, nebo vzorek se zdrsňenou zadní stranou, která rozptyluje záření tak účinně, že se nedostane do detektoru.
- často se měří při téměř kolmém dopadu (uhel dopadu $< 10\text{st.}$), kde $\cos(\text{uhel dopadu}) \sim 1$ a pak

$$r = \frac{1 - N}{1 + N}, \quad R = |r|^2 = \frac{(1 - n)^2 + k^2}{(1 + n)^2 + k^2}$$

- odrazivost citlivá pouze na k řádově srovnatelné s n , tedy typicky $k > 0.01$, tedy silné absorpční procesy

- měřením R ztrácíme informaci o fázi odrazivosti $r = \sqrt{R} e^{i\phi}$

Stanovení indexu lomu a tloušťky tenké vrstvy z reflexního spektra



Obrázek 1: Šíření světla systémem tenká vrstva – substrát.

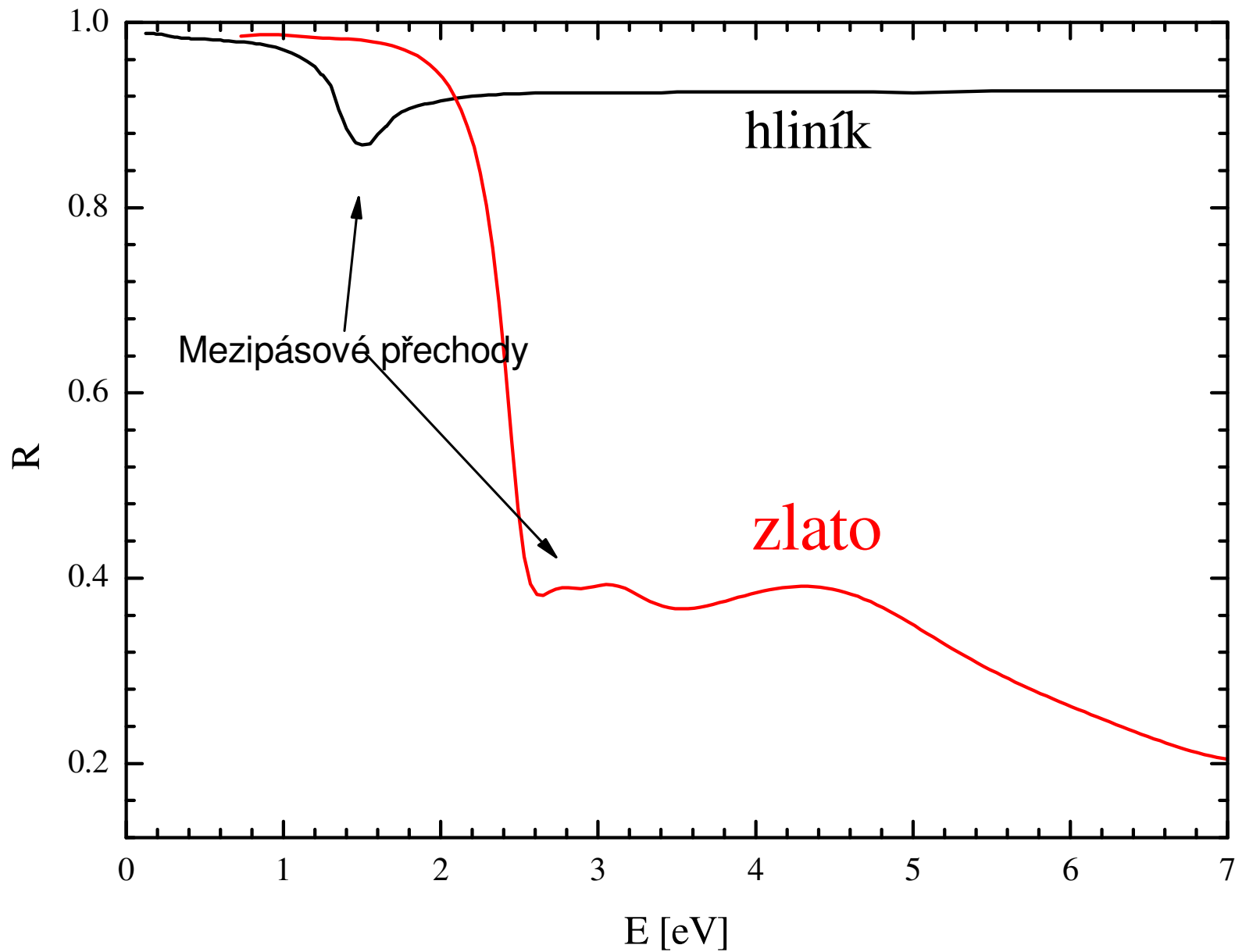
$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \cos x}{1 + r_1^2r_2^2 + 2r_1r_2 \cos x} \quad x = \frac{4\pi}{\lambda} n_1 d$$

- získání tloušťky d a indexu lomu fitováním
- index lomu aproximován Cauchyovou formulí $n_1(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}$ která je nízkofrekvenční aproximací Lorentzovy formule
- v zadání je možno použít tabelované hodnoty substrátu (Si) nebo uplatnit obrženou dielektrickou funkci v předcházejícím kroku.

Normály pro odrazivost

- množství dopadajícího světla je třeba experimentálně zjistit pomocí měření se vzorkem se známou reflektivitou.
- ve střední a vzdálené oblasti se používá vrstva zlata, odrazivost ~ 1 (0.995)
- pro vyšší frekvence se často používá hliník (avšak pozor na Al_2O_3), nebo jiné normály (Si). Normály je potřeba kalibrovat buď elipsometricky (absolutní měření), pomocí přístavku V-W nebo pomocí měření s goniometrem.
- výměna vzorku za referenční vzorek přináší nejistotu do měření (ref. vzorek může odchylovat paprsek jiným směrem). Typická nejistota cca 2% na velkých vzorcích, na malých vzorcích i větší.
- nejpřesnější normalizace je in-situ napařováním (Au nebo Al). Relativně přesně normalizuje i velmi malé vzorky (menší než 1mm) s typickou nejistotou 0.5%. Více viz C. Homes et al, applied optics 2976 (1993)

Normály pro odrazivost

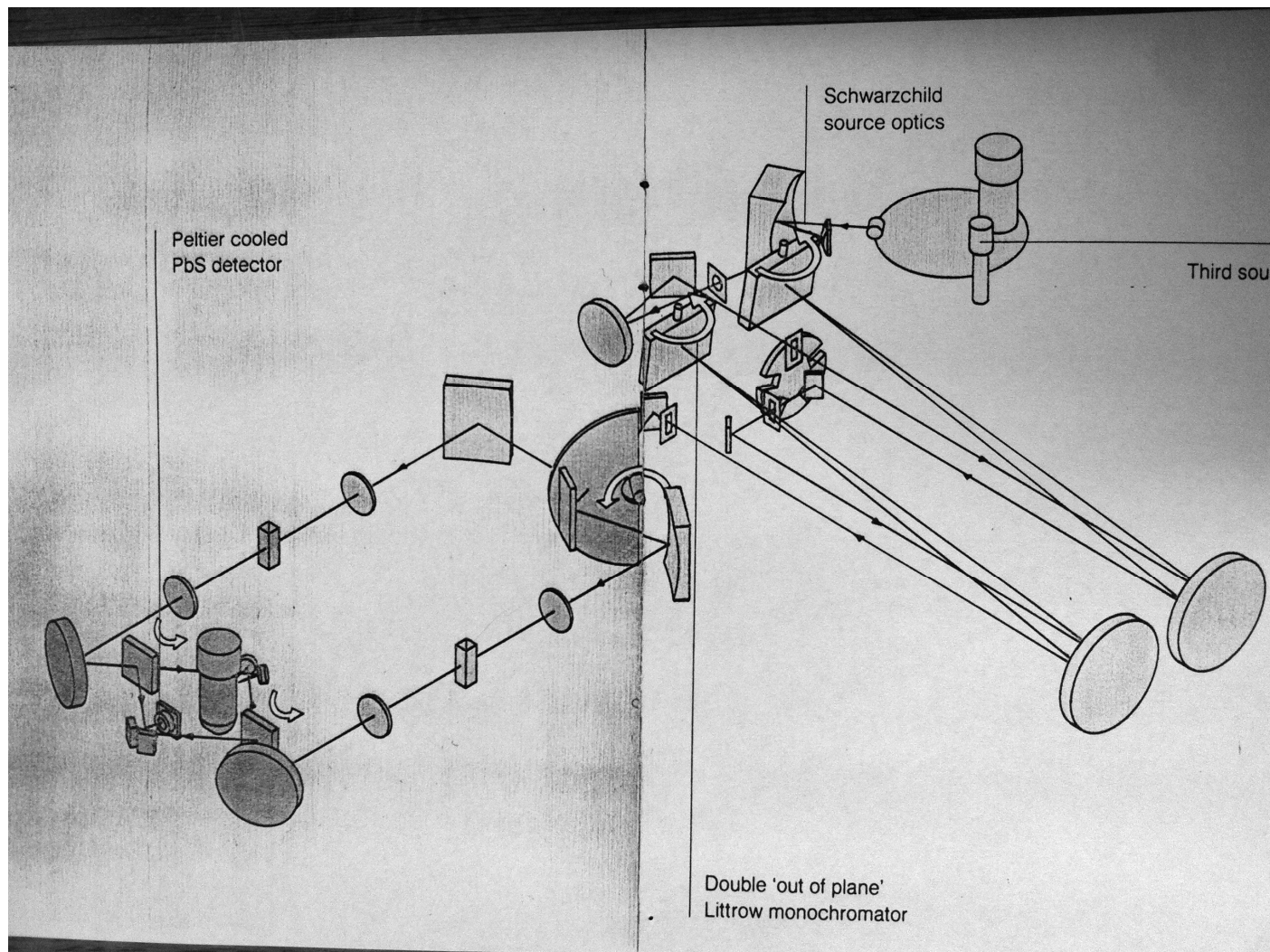


- u hliníku je třeba dát pozor na oxidaci, vznik Al_2O_3
- vysoká odrazivost hliníku až do 15 eV

- spektrometr Varian Cary 5E
- frekvenční rozsah 0.4-6.5 eV (3000 - 185 nm)



- dvoukanálově měření pro odstranění časové nestability
- PbS detektor, zakázaný pás 0,37eV, chlazený Peltierovým efektem
- fotonásobič pro VIS-UV
- halogenová žárovka (IR –VIS), deteriová výbojka (UV)
- disperzní dvoumřížkový monochromátor, vysoké rozlišení ~ 0.1 nm



Technologie přípravy rezistoru a kondenzátoru na křemíkové desce. *P. Mikulík*

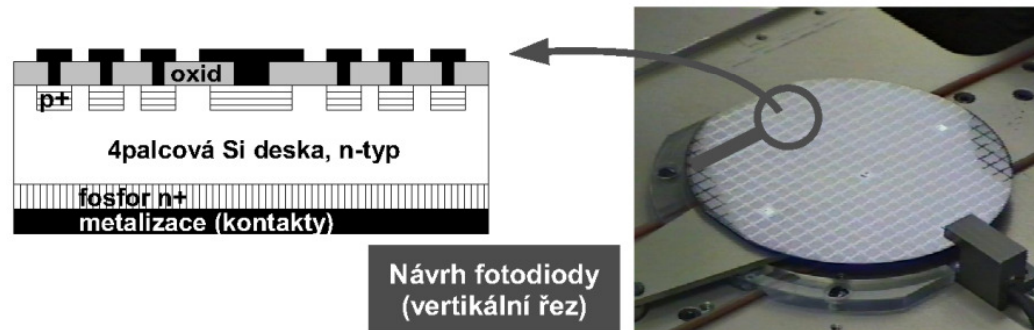
Laboratoř polovodičů – čisté prostory pro křemíkovou technologii



Ústav fyziky kondenzovaných látek
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita
Brno, Kotlářská 2 www.physics.muni.cz/ufkl

Kontakt: *prof. RNDr. Josef Humlíček, CSc.*
doc. RNDr. Petr Mikulík, Ph.D.

Fyzika pevných látek, mikroelektronika a moderní technologie polovodičů, aneb chcete si vyrobit svoje vlastní čipy? Pokuste se o to v nové laboratoři na Ústavu fyziky kondenzovaných látek!



Technologie:

fotolitografie, oxidace, difúze, naprašování, chemické procesy, měření, ...

Možnosti:

*Rezistor, kondenzátor, kontakty, ...
Dioda, fotodioda, solární článek, ...
CMOS tranzistor, ...*

Na projektu laboratoře spolupracujeme s firmou **ON Semiconductor Czech Republic, Rožnov pod Radhoštěm**, která zajistila technologická zařízení.



Kramersovy-Kronigovy relace pro odrazivost

$$R = |r|^2 = \left| \frac{N - 1}{N + 1} \right|^2 = \frac{(n - 1)^2 + k^2}{(n + 1)^2 + k^2}, \quad N = n + ik, \quad N = \sqrt{\epsilon}$$

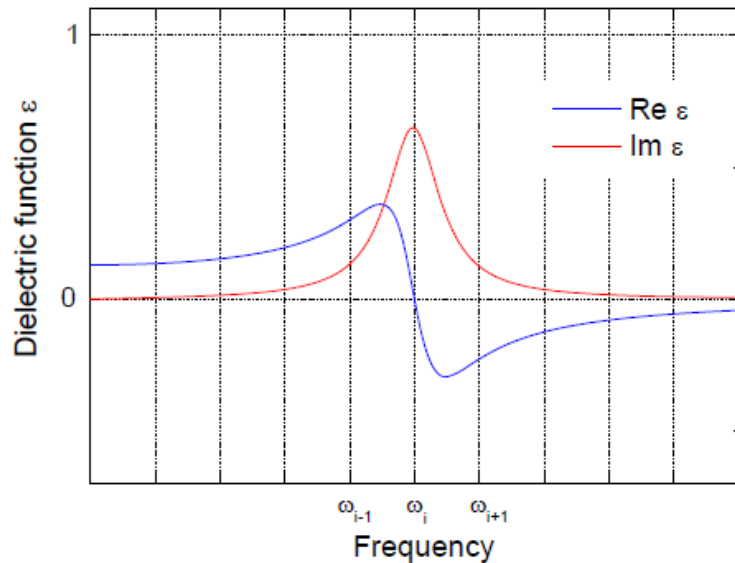
$$\ln r = \ln \sqrt{R} + i\phi$$

$$\phi(\omega_0) = -2 \frac{\omega_0}{\pi} \int_0^\infty \frac{\ln \sqrt{R(\omega)} - \ln \sqrt{R(\omega_0)}}{\omega^2 - \omega_0^2}$$

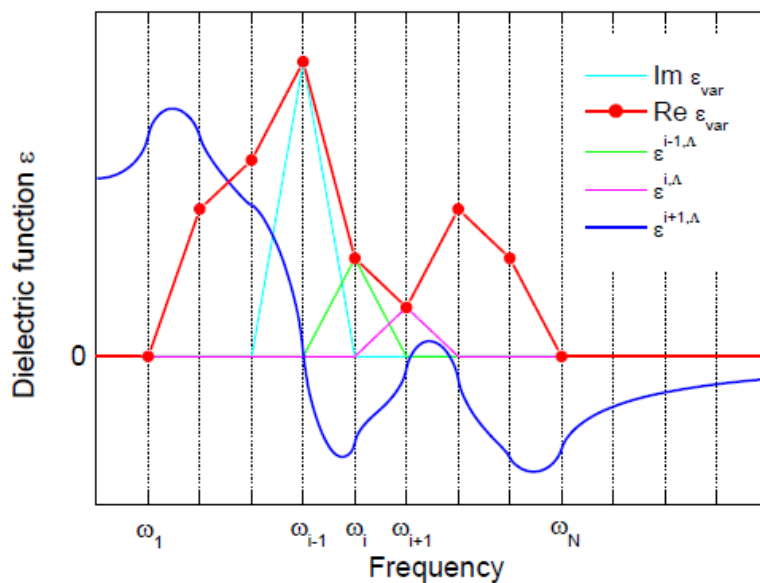
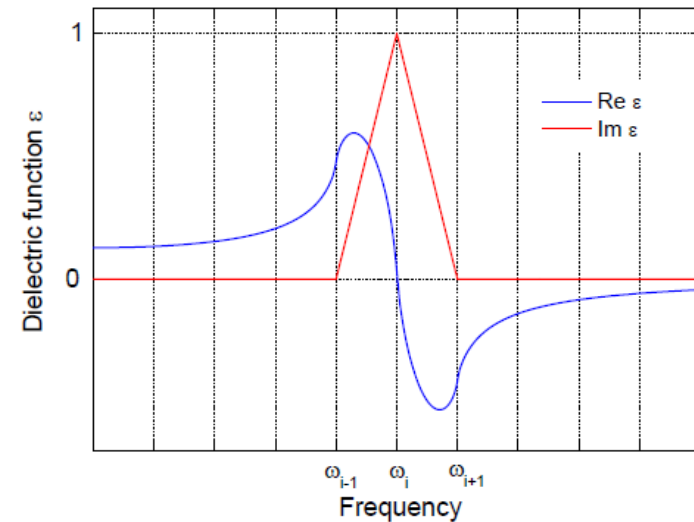
- jsou potřeba extrapolace do nulové a nekonečné frekvence
- extrapolace jsou většinou založené na Lorentzově modelu

Variační dielektrická funkce: jinak pojaté Kramersovy-Kronigovy relace - implementované v programu Reffit

Lorenzova funkce má dlouhé „ocasy“



KK obraz trojúhelníku



Variační dielektrická funkce: libovolný součet „trojúhelníků“. Je modelově nezávislá, pouze udržuje KK konzistenci

Postup pro obrdžení dielektrické funkce bod po bodu:

- naitovat rozumným počtem Lorenzových oscilátorů, tím se získají extrapolace
- provede se Kramersova-Kronigova transformace nebo ekvivalentně minimalizace variační dielektrické funkce