

**Laboratorium Fotoogniw
IKW**

Literatura

- [1] Materiały do wykładu i laboratorium (wstępy teoretyczne oraz instrukcje robocze) dostępne poprzez internet : popko.wppt.pwr.edu.pl
- [2] <https://pveducation.org/>
- [3] K.Jager i in. „Solar Energy Fundamentals, Technology, and Systems”
https://courses.edx.org/c4x/DelftX/ET.3034TU/asset/solar_energy_v1.1.pdf
- [4] [INTRODUCTION TO PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY](http://mikro.elfak.ni.ac.rs)
<http://mikro.elfak.ni.ac.rs> › [Solar-Cells-Miro-Zeman.pdf](http://mikro.elfak.ni.ac.rs)

Organizacja zajęć

- 1. Podział na grupy.**
- 2. Przydzielenie ćwiczeń. Każdy student wykonuje 6 ćwiczeń.**
- 3. Instrukcje do ćwiczeń (wstępy teoretyczne i instrukcje robocze) są na mojej stronie popko.wppt.pwr.edu.pl w zakładce Lab. Fotoogniw dla IKW**
- 4. Czas na wykonanie sprawozdania – 1 tydzień od otrzymania wyników. Przesłanie sprawozdania w terminie późniejszym jest równoznaczne z obniżeniem oceny.**
- 5. Na zajęciach studenci zapisują wyniki w protokole, który pod koniec zajęć podpisują. Podpisany protokół należy załączyć do sprawozdania.**

Co ma być w sprawozdaniu?

- 1. Opracowane wyniki według wskazówek podanych w instrukcjach do ćwiczeń na stronie popko.wppt.pwr.edu.pl.**

Co ma być w sprawozdaniu?

1. Tabele (numerowane) z wynikami pomiarów wielkości wraz z niepewnościami.

Tabela 1

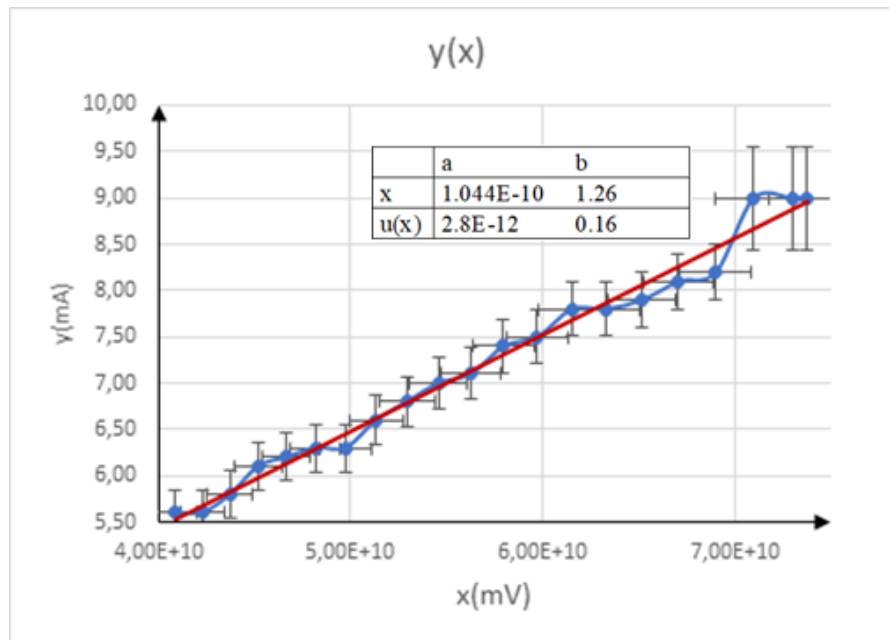
U_d [mV]	$u(U_d)$ [mV]	ε [mV]	$u(\varepsilon)$ [mV]	T [°C]	$u(T)$ [°C]	T [K]	$u(T)$ [K]
1.800	0.076	0.50000	0.00072	76.5	1.8	372.5	1.9
1.900	0.079	0.52500	0.00073	79.8	1.9	375.8	1.9
2.000	0.081	0.55000	0.00074	83.1	1.9	379.1	2.0
2.100	0.083	0.57500	0.00074	86.5	1.9	382.5	2.0
2.200	0.085	0.60000	0.00075	89.8	1.9	385.8	2.0
2.400	0.090	0.62500	0.00076	93.2	1.9	389.2	2.0
2.400	0.090	0.65000	0.00076	96.5	2.0	392.5	2.0
2.600	0.095	0.67500	0.00077	99.9	2.0	395.9	2.1
2.600	0.095	0.70000	0.00078	103.2	2.0	399.2	2.1
2.80	0.18	0.72500	0.00079	106.5	2.0	402.5	2.1

2. Przykładowe obliczenia wielkości fizycznych oraz ich niepewności wraz z jednostkami.

Co ma być w sprawozdaniu?

3. Wykresy, które podobnie jak tabele numerujemy.

- Skala + jej opis wraz z jednostkami.
- Punkty wraz z niepewnościami (lepiej nie łączyć punktów linią).
- Prosta regresji (jeśli wyniki układają się w linię prostą).
- Tabelka ze współczynnikami regresji i ich niepewnościami.




4. Obliczenie wielkości fizycznej na podstawie współczynników a lub b, czy też a i b oraz jej niepewności, również na podstawie u(a) i u(b).

Co ma być w sprawozdaniu?

4. Np. obliczenie wielkości fizycznej na podstawie współczynników a lub b , czy też a i b oraz jej niepewności, również na podstawie $u(a)$ i $u(b)$.

$$Z = \frac{1}{a} = \frac{1}{1.19081\text{E}-10} = \frac{10^{10}}{1.19081} \frac{\text{mV}}{\text{mA}} = 8.34656 \cdot 10^{10} \Omega$$

$$u(Z) = \frac{u(A)}{a^2} = \frac{2.8 \cdot 10^{-12}}{(1.1908 \cdot 10^{-10})^2} = 1.9746 \cdot 10^8 \Omega \cong 2.0 \cdot 10^8 \Omega = 0.020 \cdot 10^{10} \Omega$$


**Niepewności zaokrąglamy do drugiej cyfry znaczącej
(zawsze w górę)**

Po zaokrągleniu niepewności, zaokrąglamy wielkość fizyczną, zgodnie z zasadą ogólnie stosowana do zaokrąglania liczb:

$$Z = 8.347(20) \cdot 10^{10} \Omega$$

Co ma być w sprawozdaniu?

5. Tabele, w której dla porównania umieszczamy wszystkie otrzymane końcowe wyniki.

Dioda	E_g [eV]	λ_{\max} [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]
Niebieska	$2,586 \pm 0,016$	$480,0 \pm 2,9$	$28,0 \pm 5,8$
Czerwona	$1,8669 \pm 0,0081$	$665,0 \pm 2,9$	$23,3 \pm 5,8$
Podczerwona	$0,9289 \pm 0,0021$	$1336,5 \pm 2,9$	$68,4 \pm 5,8$
Żółta	$2,069 \pm 0,010$	$600,0 \pm 2,9$	$18,2 \pm 5,8$

6. Wnioski.

Niepewności

Rodzaj niepewności	Sposób wyznaczania
Niepewności pomiarów bezpośrednich	
<p>Niepewność standardowa typu A niepewność statystyczna</p> <p>(pomiarzy powtórzone n-krotnie)</p>	<p>Dla serii n równoważnych pomiarów niepewność pomiaru $u(x)$ utożsamiamy z estymatorem odchylenia standardowego średniej $s(\bar{x})$</p> $u_A(x) \equiv s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$ <p>gdzie $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$</p>
<p>Niepewność standardowa typu B niepewność szacowana</p> <p>(wykonany jeden pomiar lub wyniki nie wykazują rozrzutu)</p>	<p>Uwzględnia:</p> <ul style="list-style-type: none"> - niepewność wzorcowania (np. niepewność przyrządu pomiarowego $\Delta_p x$) - niepewność eksperymentatora $\Delta_e x$ - niepewność odczytu wielkości tablicowych $\Delta_t x$ - inne niepewności $u_B(x) = \sqrt{\frac{(\Delta_p x)^2}{3} + \frac{(\Delta_e x)^2}{3} + \frac{(\Delta_t x)^2}{3} + \dots}$
<p>Niepewność standardowa całkowita</p> <p>(standard uncertainty)</p> <p>(gdy obydwa typy niepewności A i B występują równocześnie)</p>	$u(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)}$ $u(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)} + \frac{(\Delta_p x)^2}{3} + \frac{(\Delta_e x)^2}{3} + \frac{(\Delta_t x)^2}{3} + \dots}$

Niepewności

<p>Niepewności pomiarów pośrednich</p>	
<p>Niepewność złożona, którą wyliczamy korzystając z wyznaczonych niepewności standardowych $u(x_j)$ pomiarów bezpośrednich (combined standard uncertainty)</p>	<p>Dla wielkości: $y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$</p> $u_c(y) = \sqrt{\sum_{j=1}^k \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right)^2 u^2(x_j)}$ <p>(wielkości x_j są nieskorelowane)</p>
<p>Niepewność rozszerzona (expanded uncertainty)</p>	$U(x) = ku(x) \quad \text{lub} \quad U_c(y) = ku_c(y)$ <p>w większości zastosowań (w tym w LPF) przyjmuje się $k=2$</p>
<p>Zapis niepewności i wyniku pomiarów (obowiązuje zasada podawania 2 cyfr znaczących niepewności po zaokrągleniu do góry)</p>	<p>Dla niepewności standardowych zalecany jest zapis z użyciem nawiasów, dla niepewności rozszerzonej z użyciem symbolu \pm.</p> <p>Pomiar masy $m=2,026$ kg, $u(m)=0,036$ zapis $m=2,026(36)$ kg</p> <p>Obliczona wartość objętości bryły i jej niepewność $V=23,5835$ m³, $u_c(V)= 0,786$ m³, $U_c(V)=1,572$ m³ zapis wyniku: $V=(23,6\pm1,6)$ m³</p>

Dokładności pomiaru i niepewności

<http://lpf.wppt.pwr.edu.pl/pomocce-dydaktyczne.php>

- **Miernik cyfrowy**

3. Multimetr M-3850 M-3860D

FUNKCJA	ZAKRES	DOKŁADNOŚĆ	ROZDZIELCZOŚĆ
Napięcie stałe (DC V) M-3850, M-3860D	400 mV	$\pm 0,3 \% \text{ rdg} + 1 \text{ dgt}$	100 μV
	4 V		1 mV
	40 V		10 mV
	400 V		100 mV
	1000 V	$\pm 0,5 \% \text{ rdg} + 1 \text{ dgt}$	1 V

Przykład: pomiar $U=125.1\text{mV}$

$$\Delta U = \pm 0.003 \cdot 125.1\text{mV} + 0.1\text{mV} = 0,4753\text{mV}$$

$$u(U) = \frac{0,4753\text{mV}}{\sqrt{3}} = 0,1584(3) \cong 0,2\text{mV} \quad U = (125.1 \pm 0,2)\text{mV}$$

Dokładności pomiaru i niepewności

- Miernik analogowy: $\Delta X = \frac{\textit{klasa} \cdot \textit{zakres}}{100}$

Przykład 1.

$U = 1\text{mV}$, zakres $U_z = 100\text{mV}$, klasa 2

$$\Delta U = \frac{2 \cdot 100}{100} \text{mV} = 2\text{mV} \quad \text{Dokładność większa aniżeli pomiar!}$$

Przykład 2.

$U = 50\text{mV}$, zakres $U_z = 100\text{mV}$, klasa 2

$$\Delta U = \frac{2 \cdot 100}{100} \text{mV} = 2\text{mV} \quad \text{Dokładność dużo mniejsza aniżeli pomiar .OK!}$$

Pomiary wykonujemy zawsze tak, aby wynik mieścił się bliżej końca zakresu pomiarowego.

Niepewności

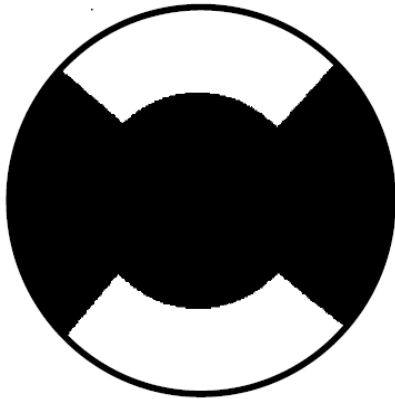
- **Regresja liniowa - zakładka Excel Fizyka 3.3**

popko.wppt.pwr.edu.pl

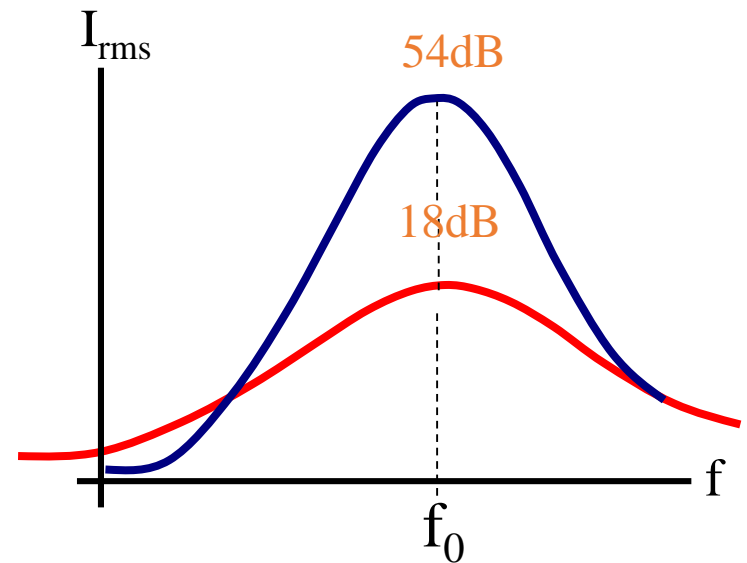
Nanowoltomierz selektywny

Nanowoltomierz selektywny posiada na wejściu obwód rezonansowy, który należy dostroić do częstości modulatora.

Octave selectivity - czułość na oktawę. Ustawić na 54dB



Tarcza modulatora. Wiązka światła jest w czasie $T/4$ odsłaniana i w takim samym czasie przysyłana. Częstość modulacji zależy od częstości obrotów silnika i liczby skrzydełek wiatraczka. Dla 2 skrzydełek, $f = 2f_{silnika}$.



Nanowoltomierz selektywny



SENSITIVITY – czułość (zakres pomiarowy) – przed włączeniem ustawić na 100mV
FREQUENCY RANGE – zakres częstości. Wybrać taki, w którym mieści się częstość modulatora

OCTAVE SELECTIVITY– selektywność. Ustawić na 54dB.

TIME CONSTANT– stała czasowa. Ustawić wyjściowo na „low”.

FREQUENCY – częstość. Ustawić pokrętko tak, aby częstość była równa częstości modulatora.

INPUT – wejście, do którego podłączamy bezpośrednio wyjście z detektora.

PREAMPLIFIER POWER SUPPLY – wejście, do którego podłączamy przedwzmacniacz, jeśli wyjście z detektora podłączamy do przedwzmacniacza.

Jak uwzględnić wzmocnienie przedwzmacniacza?

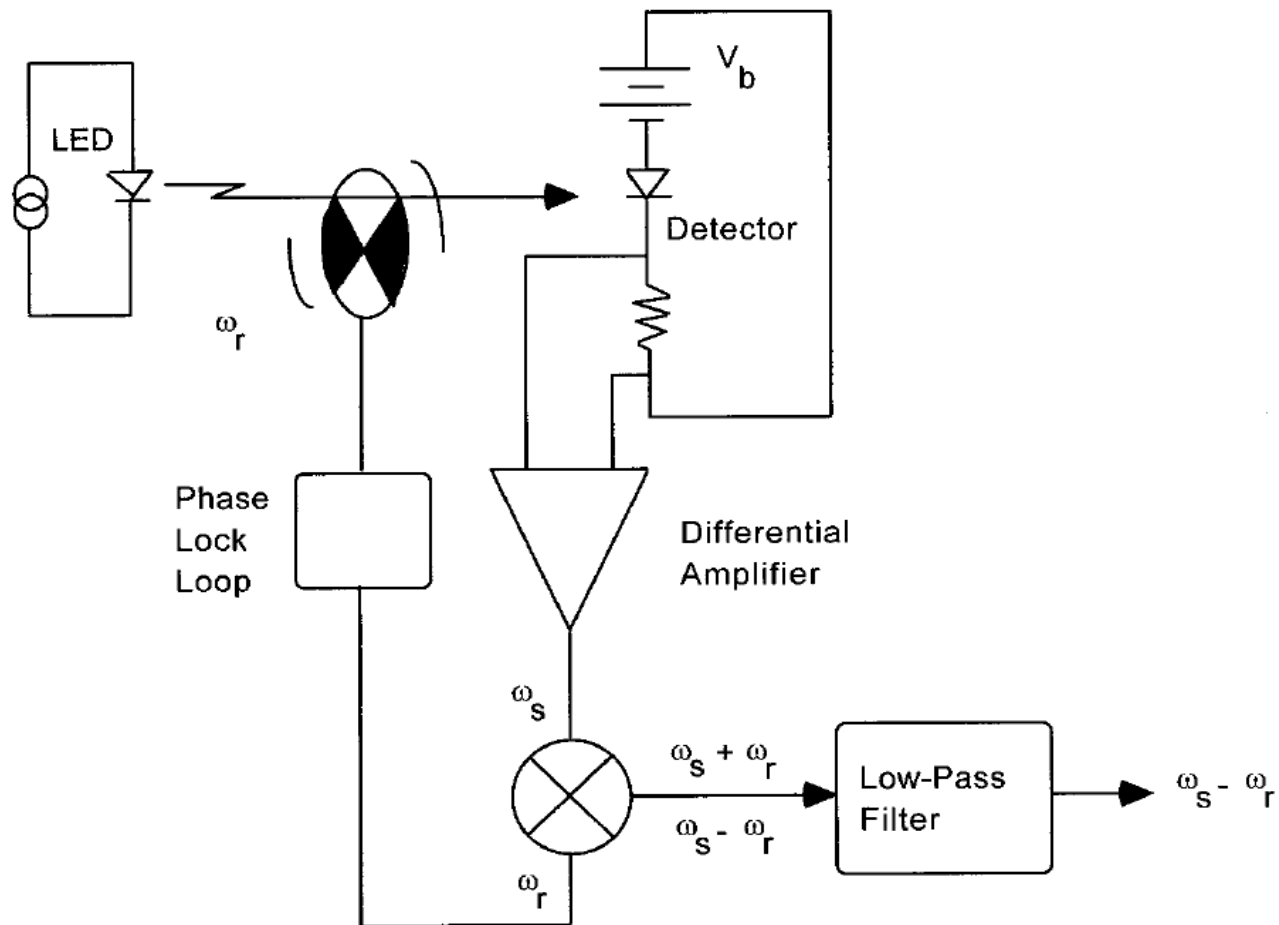
Jeśli napięcie na wyjściu czujnika jest wzmocnione przez wzmacniacz o wzmocnieniu k [dB] i jego wartość zmierzona wynosi U_m , wówczas napięcie rzeczywiste na detektorze U_d jest równe:

$$k \text{ [dB]} = 10 \lg \left(\frac{P_{wy}}{P_{we}} \right) = 10 \lg \left(\frac{U_m^2}{U_d^2} \right) = 20 \lg \left(\frac{U_m}{U_d} \right) \Rightarrow$$

$$\lg \left(\frac{U_m}{U_d} \right) = \frac{k}{20} \Rightarrow U_d = U_m \cdot 10^{-k/20}$$

(Np. jeśli $k = 20 \Rightarrow U_d = U_m/10$)

Detektor fazoczuły lock-in (nanowoltomierz homodynowy)



Lock-in

Sygnal mierzony:

$$V_{\text{sig}} \sin(\omega_s t + \theta_{\text{sig}})$$

Sygnal referencyjny:

$$V_r \sin(\omega_r t + \theta_{\text{ref}})$$

Sygnal na wyjściu lock-in'a:

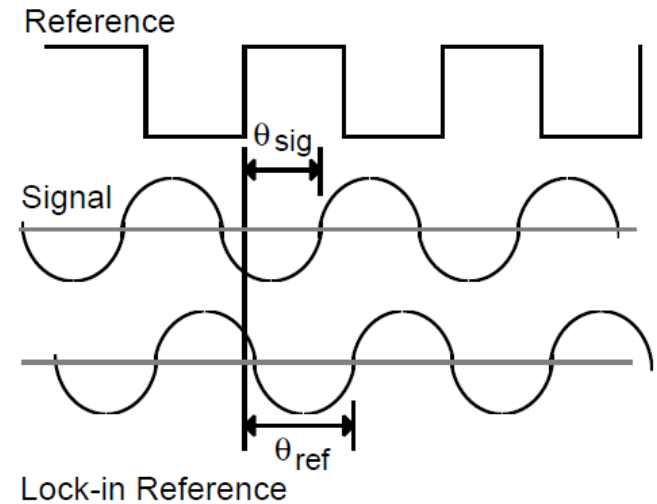
$$\begin{aligned} V_{\text{psd}} &= V_{\text{sig}} V_r \sin(\omega_s t + \theta_{\text{sig}}) \sin(\omega_r t + \theta_{\text{ref}}) \\ &= \frac{1}{2} V_{\text{sig}} V_r \cos([\omega_s - \omega_r]t + \theta_{\text{sig}} - \theta_{\text{ref}}) - \\ &\quad \frac{1}{2} V_{\text{sig}} V_r \cos([\omega_s + \omega_r]t + \theta_{\text{sig}} + \theta_{\text{ref}}) \end{aligned}$$

Filtr dolnoprzepustowy eliminuje sygnał o częstotliwości $\omega_s + \omega_r$.

Dla $\omega_r = \omega_s$ sygnał na wyjściu jest stały i największy dla różnicy faz równej zero.

$$V_{\text{psd}} = \frac{1}{2} V_{\text{sig}} V_r \cos(\theta_{\text{sig}} - \theta_{\text{ref}})$$

Ustalamy położenie pokrętła PHASE SHIFT (przesunięcie fazowe), aby sygnał był jak największy.



$$\sin\alpha \sin\beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]$$

Nanowoltomierz lock-in

Nanowoltomierz typu lock-in służy do pomiarów słabych sygnałów periodycznych.

Dlaczego nie wystarczy wzmacniacz AC?

Przykład.

Niech $V_{sig} = 10nV$ i $f = 10kHz$. Szum dobrego wzmacniacza tj. $5nV/\sqrt{Hz}$. Jeśli pasmo przenoszenia wzmacniacza jest $100kHz$ a wzmocnienie 1000 to sygnał wyjściowy będzie równy $10\mu V$. Tymczasem szum będzie równy:
 $5nV/\sqrt{Hz} \cdot \sqrt{100kHz} \cdot 1000 = 1.6mV!$

Wzmacniacz z detektorem fazoczułym (PSD) może wzmacniać sygnał przy $10kHz$ przy szerokości pasma przenoszenia $0,01Hz$. Stąd szum będzie równy jedynie $0,5\mu V$.

lock-in



DC ZERO – przycisk włączony przed włączeniem POWER miernika.

RECOVER SIGNAL – przycisk włączony podczas pomiaru.

SENSITIVITY – czułość (zakres pomiarowy) – przed włączeniem ustawić na 30mV

BAND PASS FILTER– zakres częstości. Wybrać taki, w którym mieści się częstość modulatora

TIME CONSTANT– stała czasowa. Ustawić wyjściowo na 0,3s.

PHASE SHIFT – przesunięcie fazowe; regulujemy tak aby sygnał był maksymalny, używając przycisków 0° lub 90° a następnie pokręćła CONTINUOUS (zmiana ciągła)

SIGNAL – wejście, do którego podłączamy bezpośrednio wyjście z detektora

PREAMPLIFIER POWER SUPPLY – wejście, do którego podłączamy przedwzmacniacz

REFERENCE – wejście sygnału referencyjnego (wyjście z modulatora).

Dokładność pomiaru długości fali

Przykładowy odczyt wyniku ze skali monochromatora SPM-2



Górna skala – długość fali w μm .

Dolna skala – szerokość szczeliny w mm

Przy szczelinie 1mm: przedłużenie

podziałek skali dolnej (czerwone linie),
odpowiadające szerokości szczeliny 1mm,
odcina na skali górnej $\pm 30\text{nm}$

Przy szczelinie 1mm: $(1200 \pm 30)\text{nm}$

Przy szczelinie 0.5mm: $(1200 \pm 15)\text{nm}$

Przy szczelinie 0.1mm: $(1200 \pm 3)\text{nm}$

Przy szczelinie x mm: $(1200 \pm x \cdot 30)\text{nm}$

Uwaga: *niepewność* = *dokładność* / $\sqrt{3}$

Pomiar charakterystyk C-V

Mostek pojemności działa tak jak miernik typu lock-in. Kondensator, którego pojemność chcemy zmierzyć podłączony na wejście mostka pojemności jest w rzeczywistości połączony szeregowo z rezystancją wejściową mostka. Mostek generuje niewielkie napięcie przemiennie, które jednocześnie służy jako referencyjne dla lock-in'a. Prąd płynący przez rezystor pozostaje w fazie z tym napięciem podczas gdy w kondensatorze prąd i napięcie są przesunięte w fazie o 90° . Lock-in porównuje prąd, który jest w fazie z napięciem z prądem, który jest przesunięty w fazie o 90° . Składowa, która jest w fazie z prądem stanowi rezystancję a składowa przesunięta w fazie o $+90^\circ$ - pojemność. Składowa przesunięta w fazie o -90° jest indukcyjnością.

Programowalny mostek Boonton 7200



Po podłączeniu kondensatora (diody) do wejścia mostka (HI i LO) oprócz jego pojemności mostek „widzi” pasożytniczą pojemność (rzędu kilku pF). Mostek jest wyposażony w wewnętrzne źródło napięcia stałego, które umożliwia polaryzację diody.