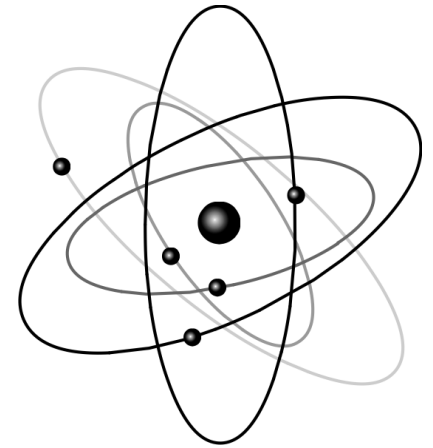




Seminarium Wydziału FiIS,
12 maja 2017



**Badanie właściwości laserów
i wyznaczanie temperatury Debye'a –
nowe ćwiczenia w pracowniach
studenckich WFiIS**

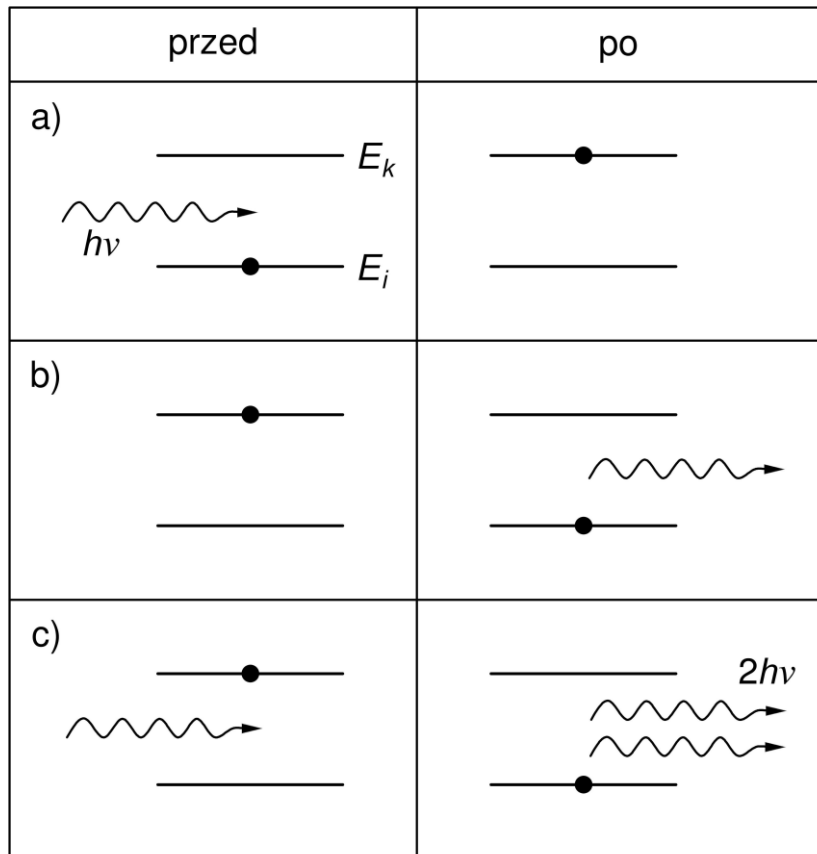
Andrzej Zięba

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, AGH Kraków

Plan:

1. Wstęp – stulecie emisji wymuszonej
2. Laser półprzewodnikowy
3. Laser z podwojeniem częstotliwości
3. Pomiar średniego ciepła właściwego i wyznaczenie temperatury Debye'a
5. Konkluzje i podziękowania

Emisja wymuszona – podstawa działania wszystkich laserów



Absorpcja: $\propto B_{12}$

Emisja spontaniczna $\propto A_{21}$

Emisja wymuszona $\propto B_{21}$

Einstein 1917 (**stulecie !**):

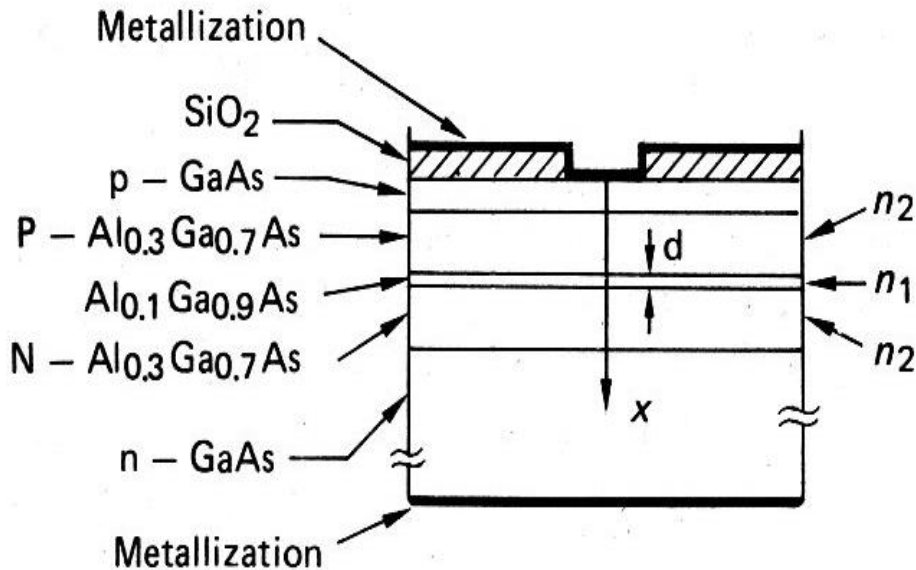
$$B_{21} = B_{12}$$

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h}{c^3} \nu^3$$

Ćwiczenie 86
w Pracowni Fizycznej:

Laser półprzewodnikowy

Parę szczegółów działania lasera czerwonego (struktura lasera fioletowego jest bardziej złożona)

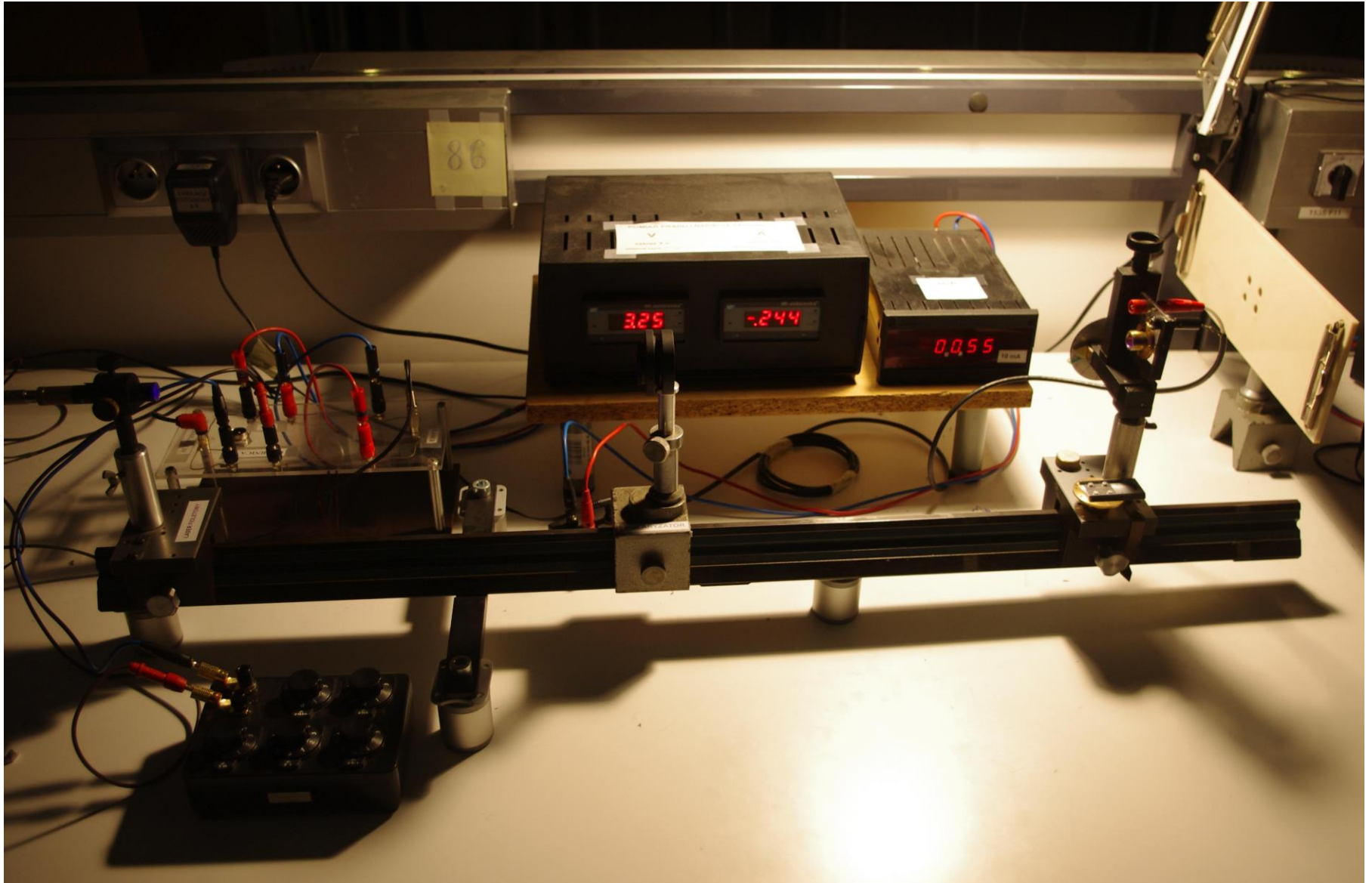


Rekombinacja (spontaniczna i wymuszona) zachodzi w obszarze Al_{0,1}Ga_{0,9}As o zmniejszonej wartości przerwy energetycznej i powiększonym wsp. załamania

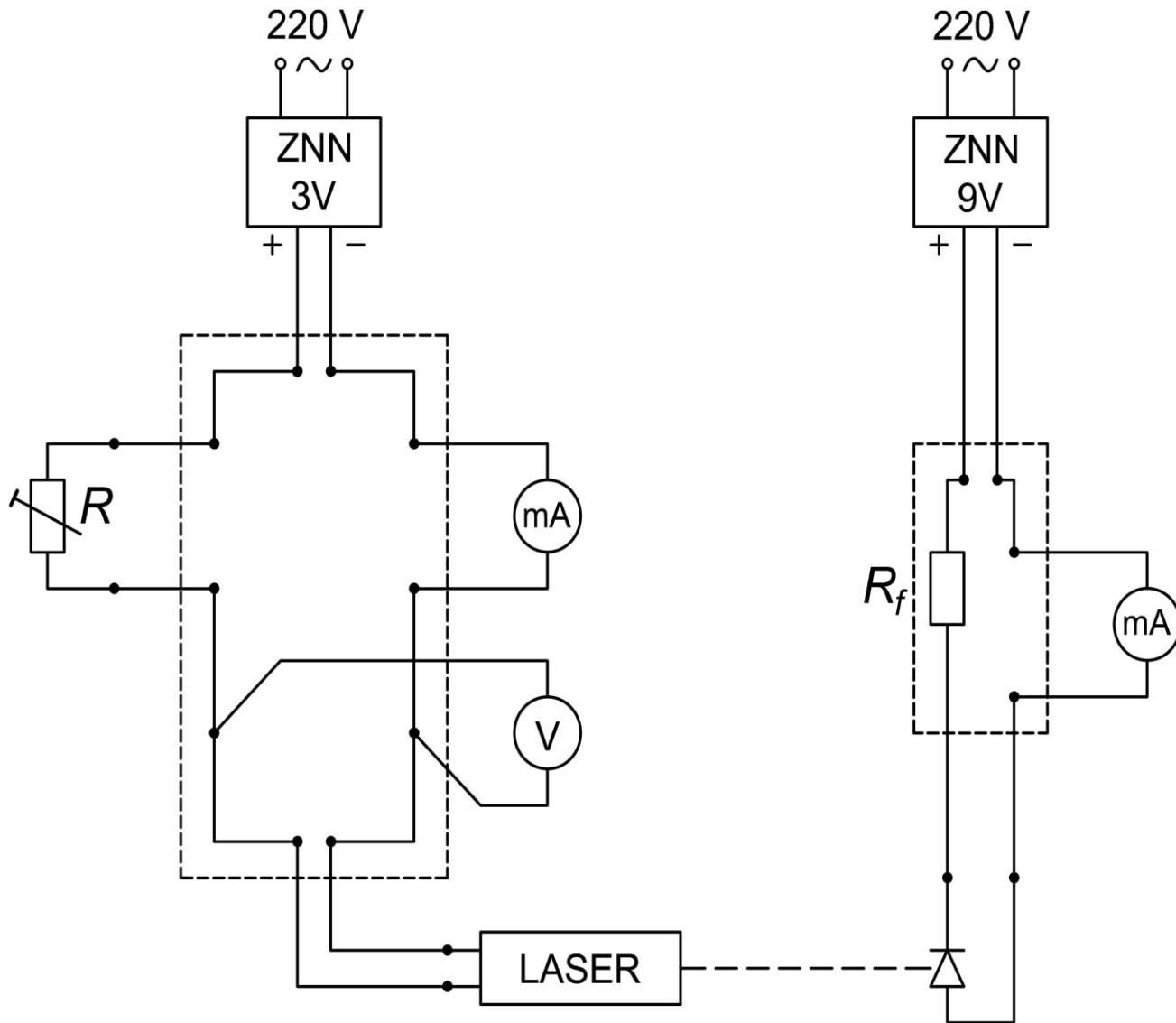
Warstwa ta, grubości 1 μm lub mniej, działa jak światłowód, gdyż $n_1 > n_2$

Wychodzące ze struktury pp światło ulega ugięciu na tym małym „otworze”. Aby uzyskać wiązkę równoległą potrzebna jest soczewka.

Zestaw do ćwiczenia 86



Układ elektryczny (obydwu ćwiczeń)



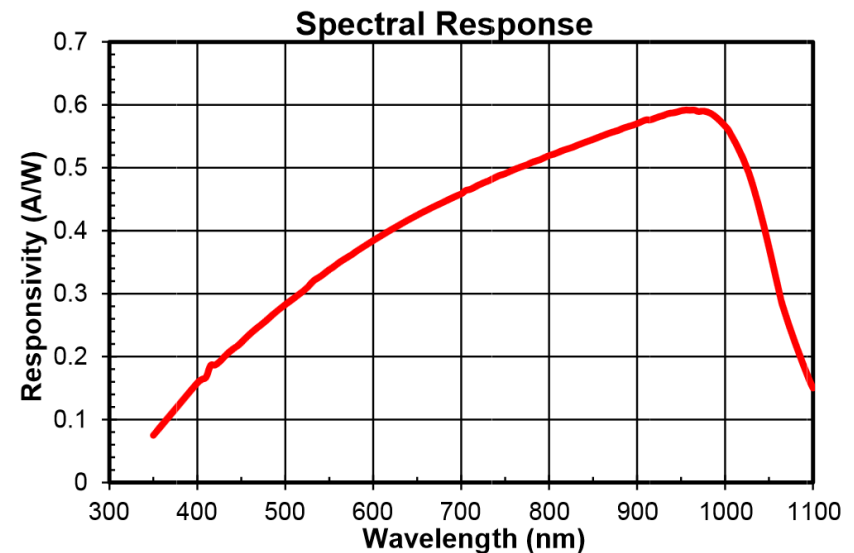
Moc wiązki z pomiaru prądu fotodiody

- Fotodioda krzemowa FDS -100,
powierzchnia czynna: 3,4×3,4 mm



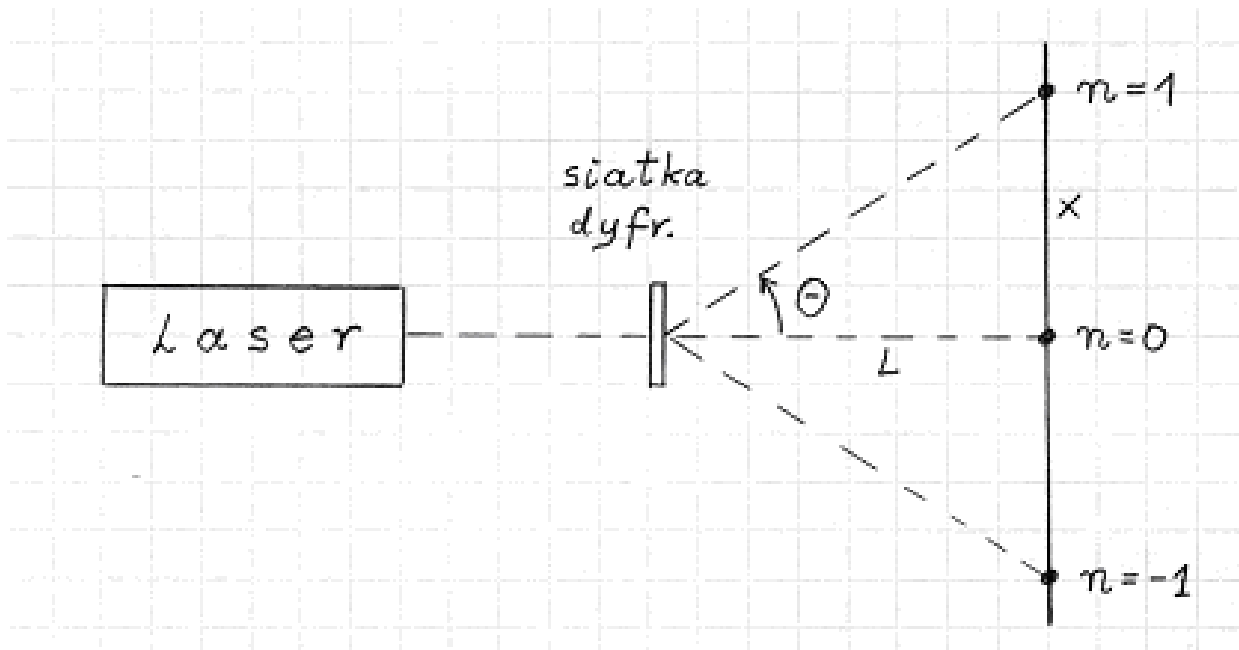
- Przeliczenie prądu diody na moc wiązki:

$$P_2 = \frac{I_f}{C(\lambda)}$$



A. Pomiar długości fali

Siatka dyfrakcyjna i ekran umieszczone między laserem i układem detekcyjnym. Nie wykonujemy żadnych pomiarów elektrycznych.



$$d \sin \theta = n\lambda \quad , \quad \sin \theta = \frac{x}{\sqrt{L^2 + x^2}}$$

B. Pomiar mocy wyjściowej i sprawności

Moc wiązki:

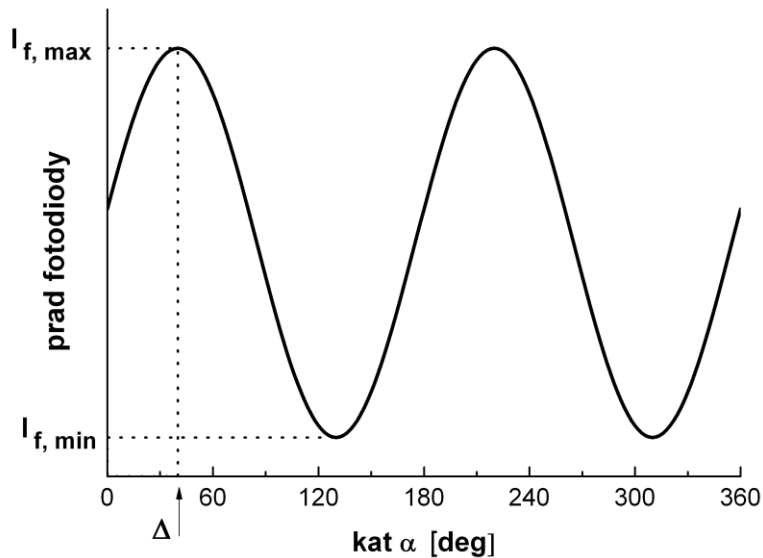
laser czerwony	1,3 mW
laser fioletowy	30 mW

Sprawność

laser czerwony	1,4%
laser fioletowy	4,1%

Laser jest przetwornikiem energii, dla którego wyznaczenie sprawności jest łatwiejsze niż dla innych urządzeń.

C. Badanie polaryzacji wiązki



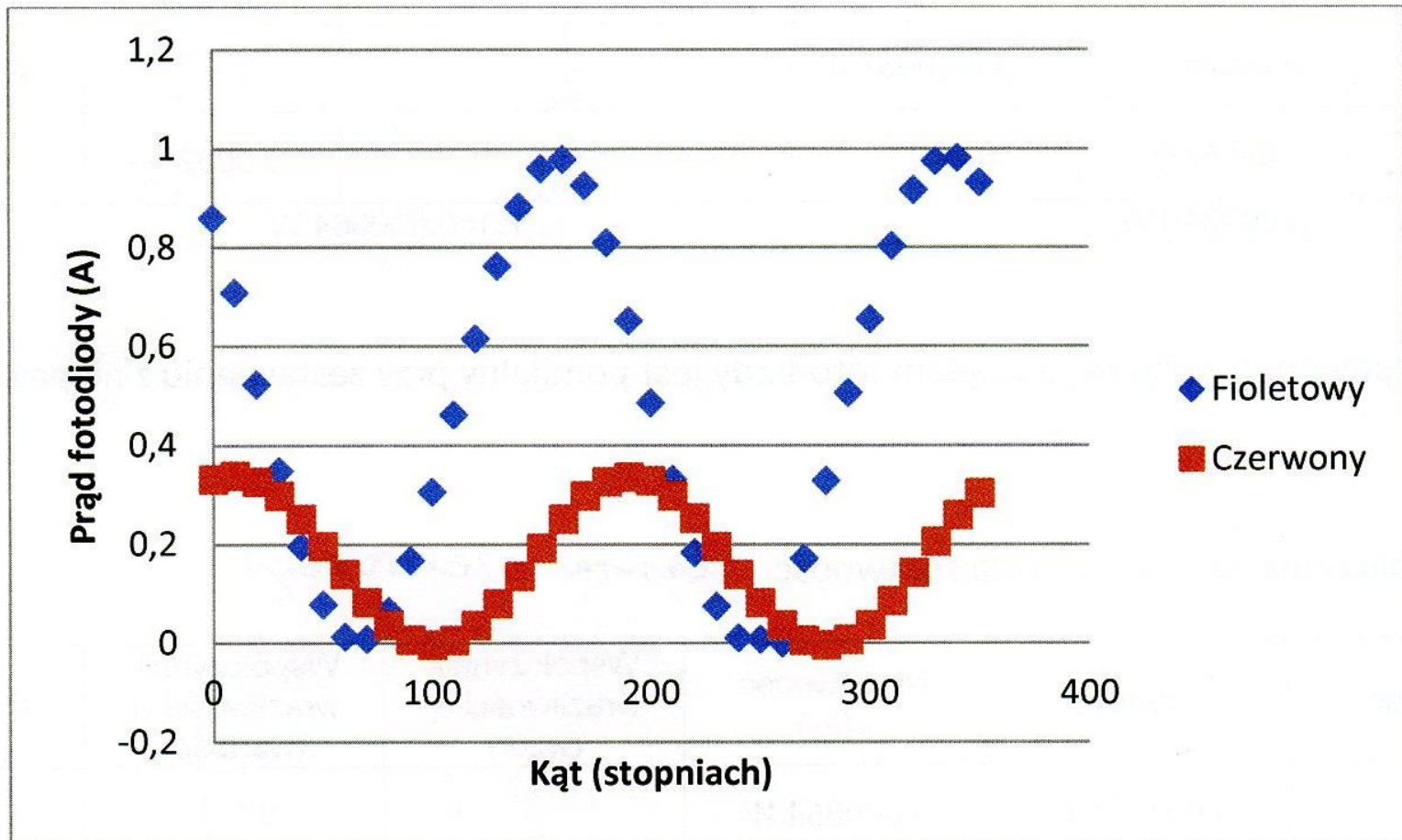
- Prawo Malusa

$$I_f(\alpha) = I_{f, \max} \cos^2 \alpha$$

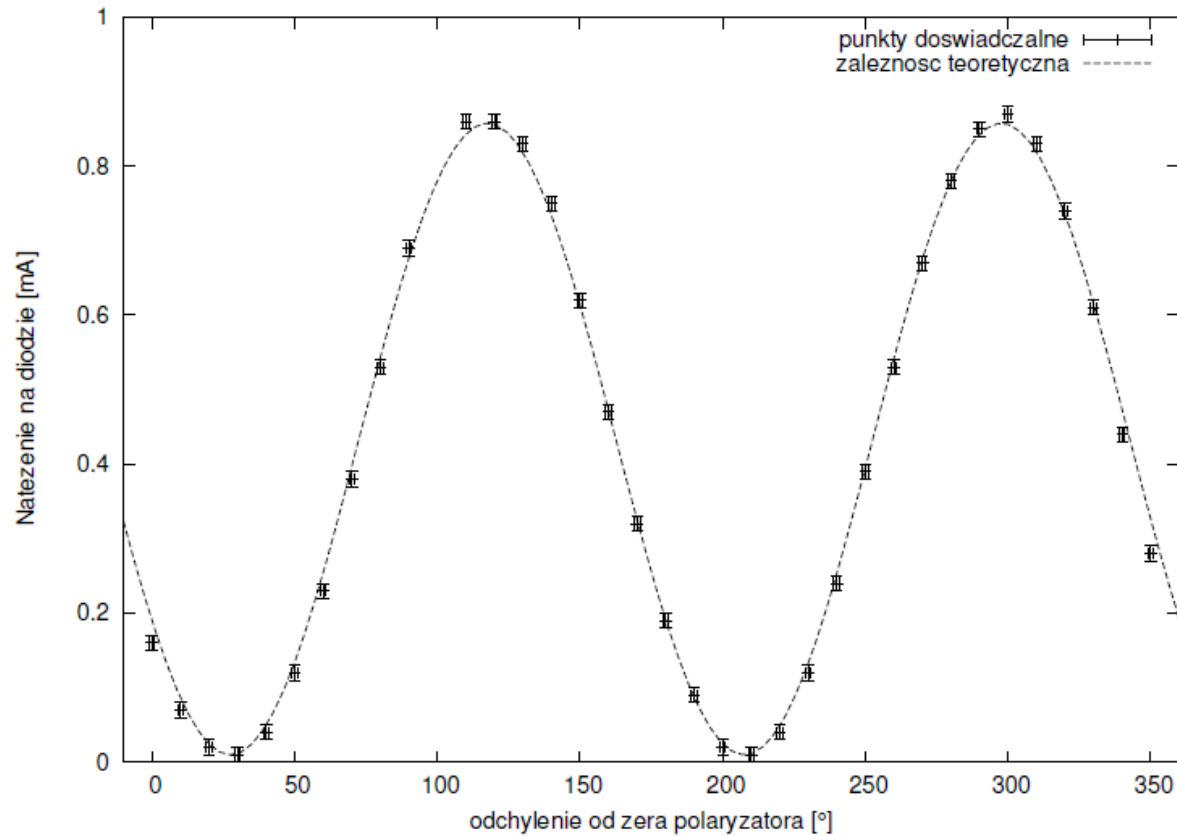
- Wzór roboczy,
(uwzględniający przesunięcie skali i nieidealność polaryzatora)

$$I_f(\alpha) = I_{f, \min} + (I_{f, \max} - I_{f, \min}) \cos^2(\alpha - \Delta)$$

Przykład: polaryzacja światła lasera czerwonego i fioletowego



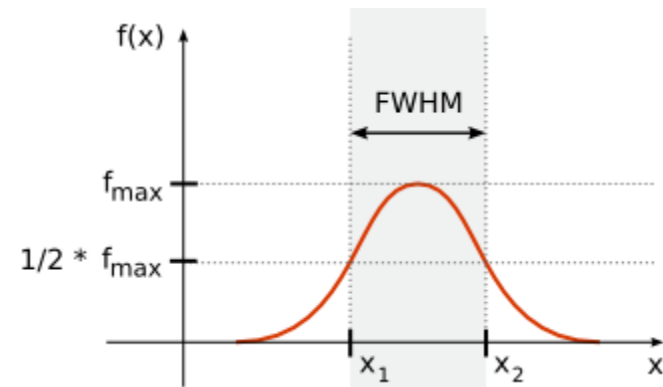
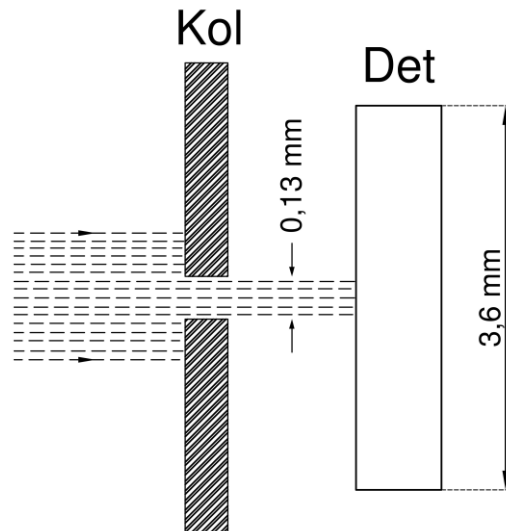
Przykład: punkty eksp. i krzywa teoretyczna dla lasera czerwonego



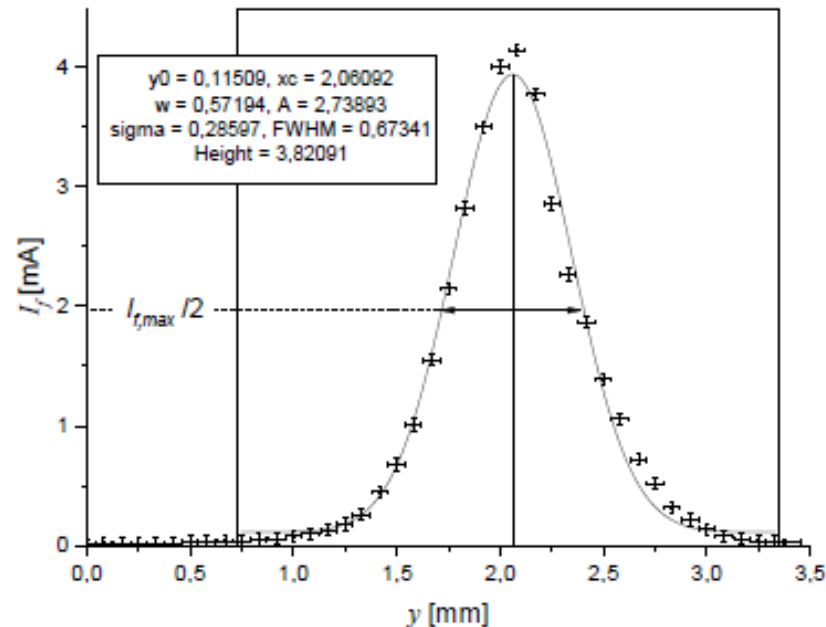
D. Profil wiązki

a) geometria kolimatora

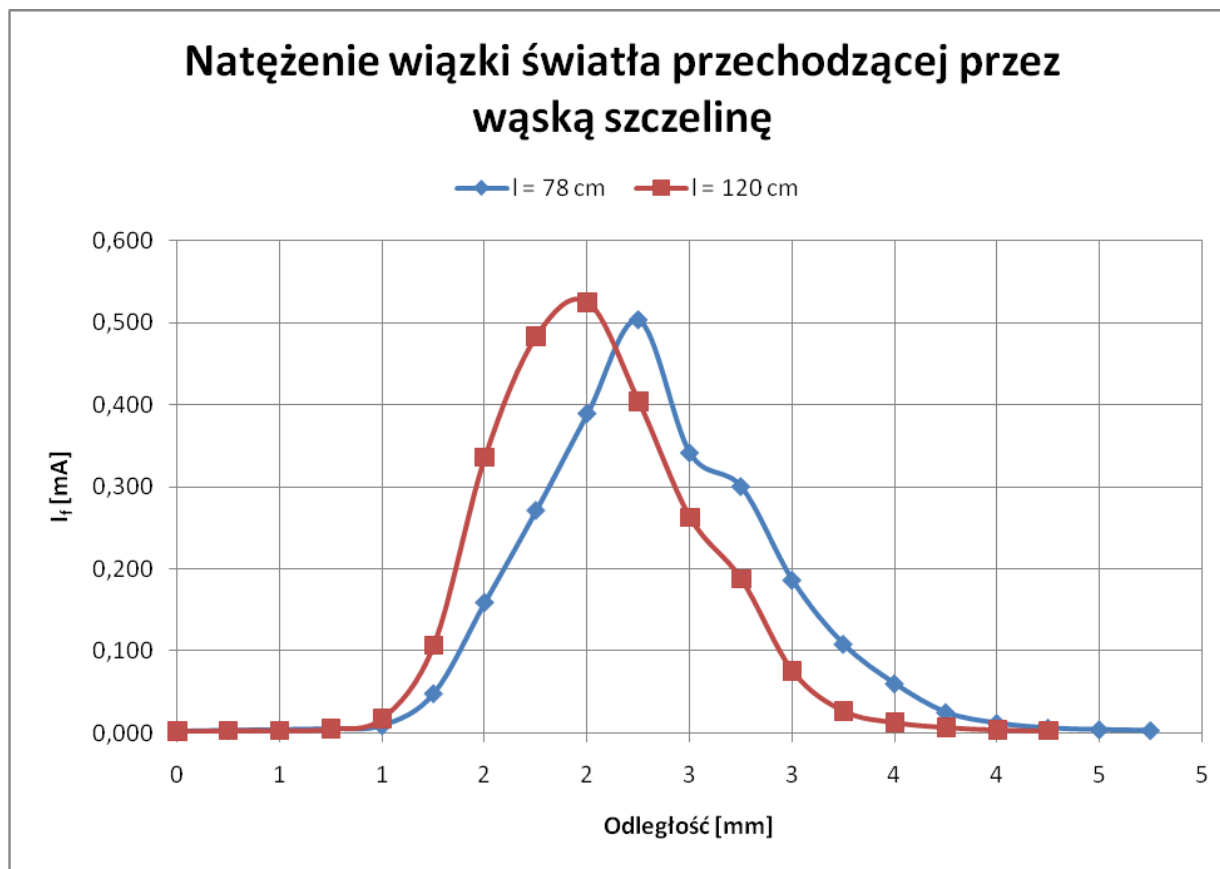
b) definicja szerokości połówkowej



Przykład: pomiar profilu + wyznaczenie szerokość wiązki z dopasowanej krzywej Gaussa.
FWHM = 0,67mm



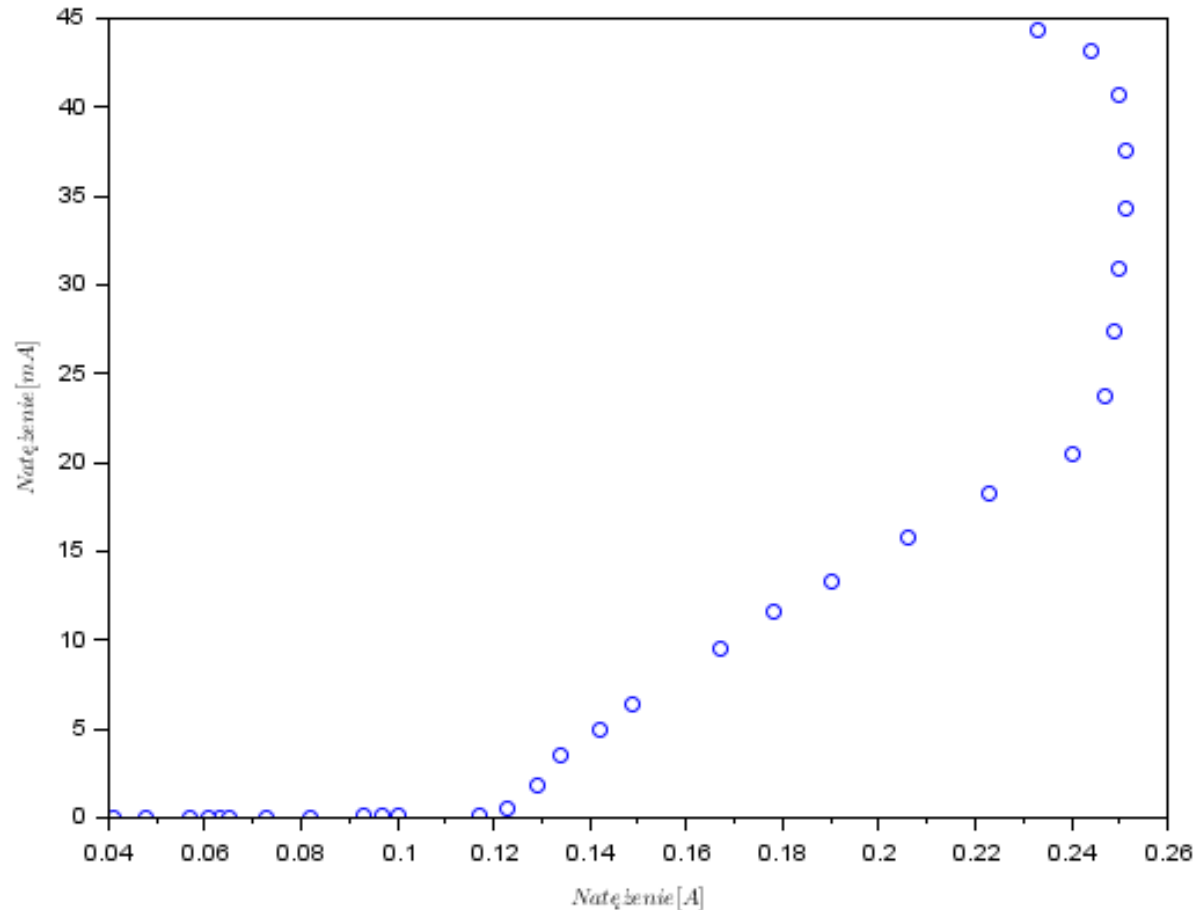
Przykład: profil wiązki lasera fioletowego w dwóch odległościach od lasera



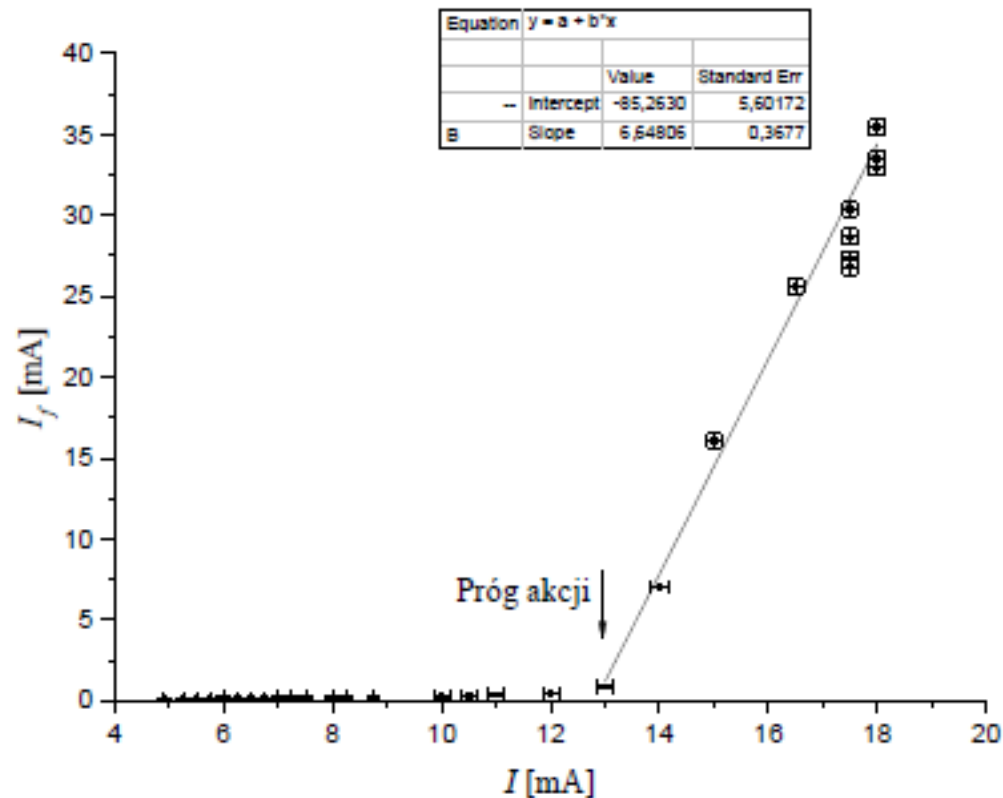
E. Próg akcji laserowej

- Tylko w tym wariantcie wykorzystuje się opornik dekadowy do regulacji natężenia prądu
- Istnienie minimalnego prądu potrzebnego do zadziałania lasera jest pośrednim dowodem istnienia emisji wymuszonej i inwersji obsadzeń

Przykład: pomiar prądu progowego dla lasera fioletowego, $I_c = 120 \text{ mA}$



Przykład: pomiar progu akcji laserowej dla lasera czerwonego ($I_C = 13\text{mA}$). Poniżej progu laser emituje słabe światło, prawdopodobnie działając jak dioda LED

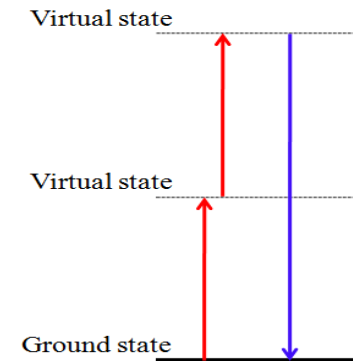
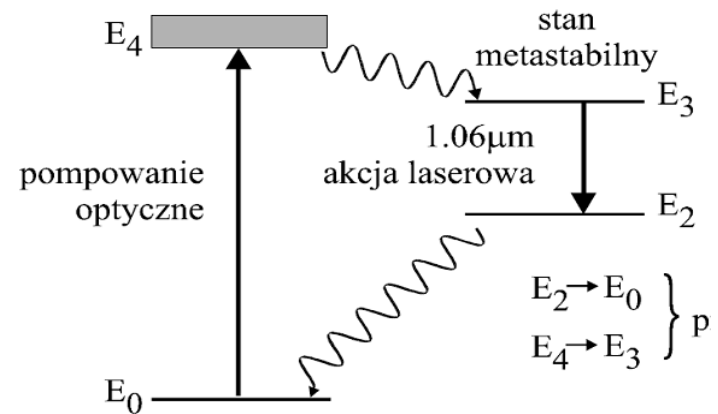


Ćwiczenie 87
w Pracowni Fizycznej:

**Laser z podwojeniem
częstotliwości**

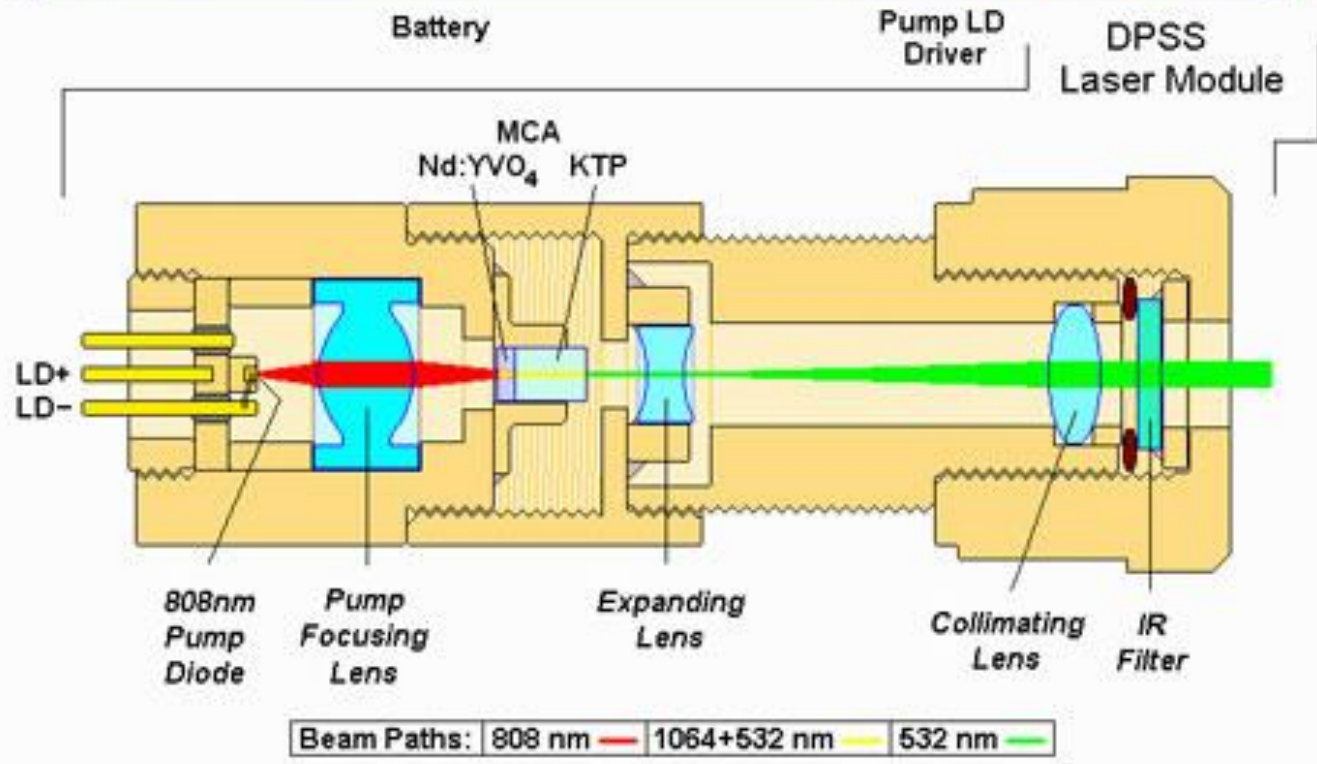
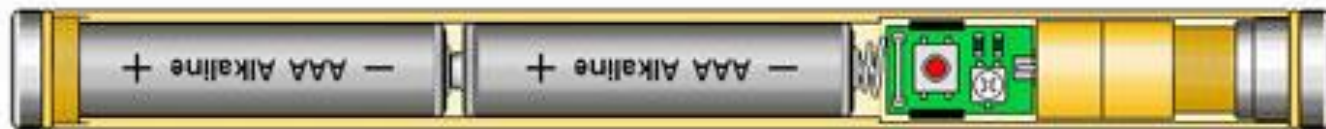
Działanie lasera typu „zielony wskaźnik”: dwa niebanalne zjawiska optyczne

- dioda świecąca GaAs wytwarza wiązkę 908 nm, pompującą ośrodek czynny lasera
- akcja laserowa (laser 4-poziomowy) zachodzi na jonach Nd^{3+} w kryształce Nd:YVO_4
- uzyskane z lasera światło podczerwone 1064 nm jest transformowane na zielone 532 nm w kryształce optycznie nieliniowym KTP (czyli KTiOPO_4)

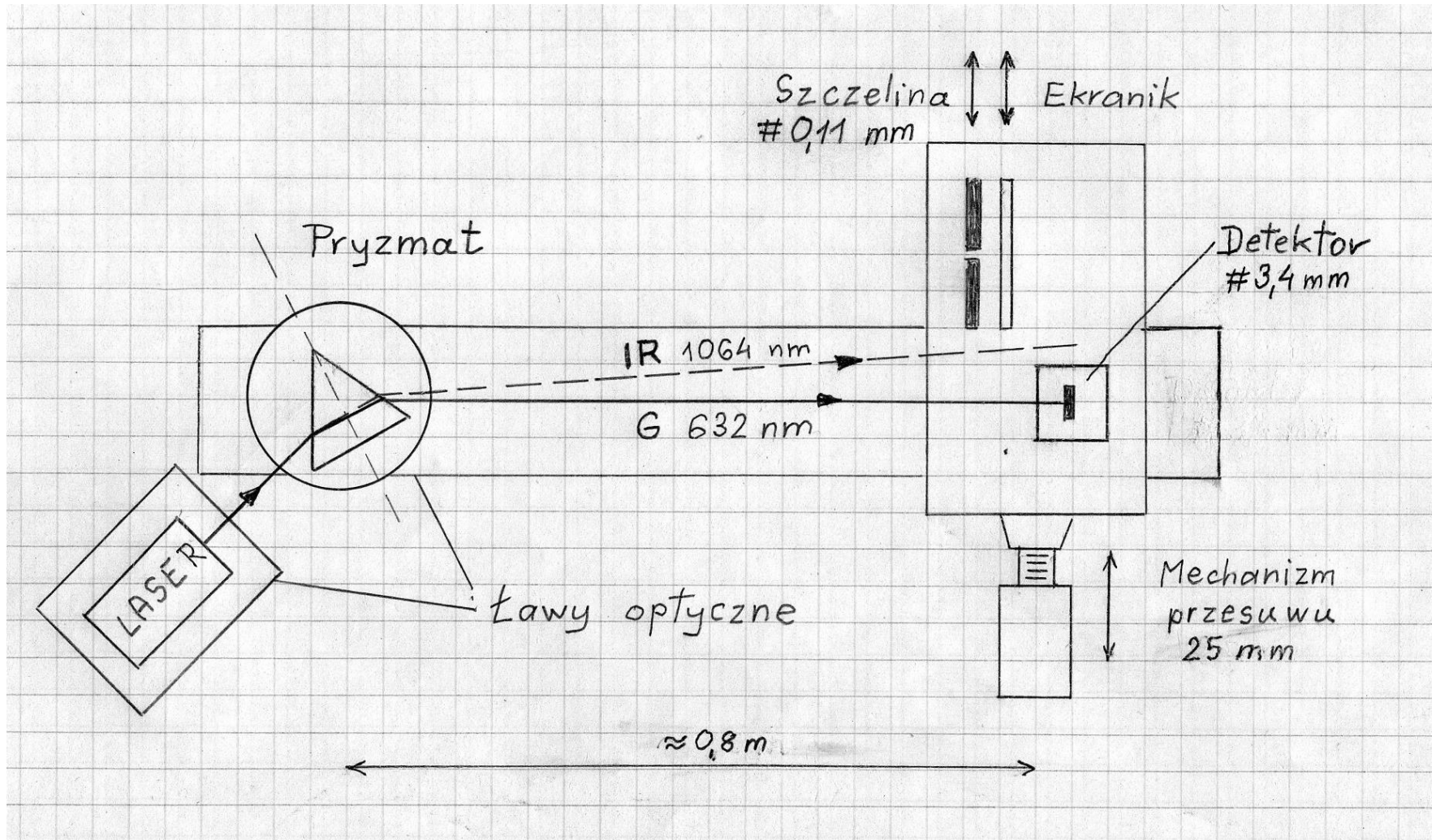


Schemat budowy lasera zielonego typu „wskaznik”

(wg. *Wikipedii*)



Układ optyczno-mechaniczny ćwiczenia



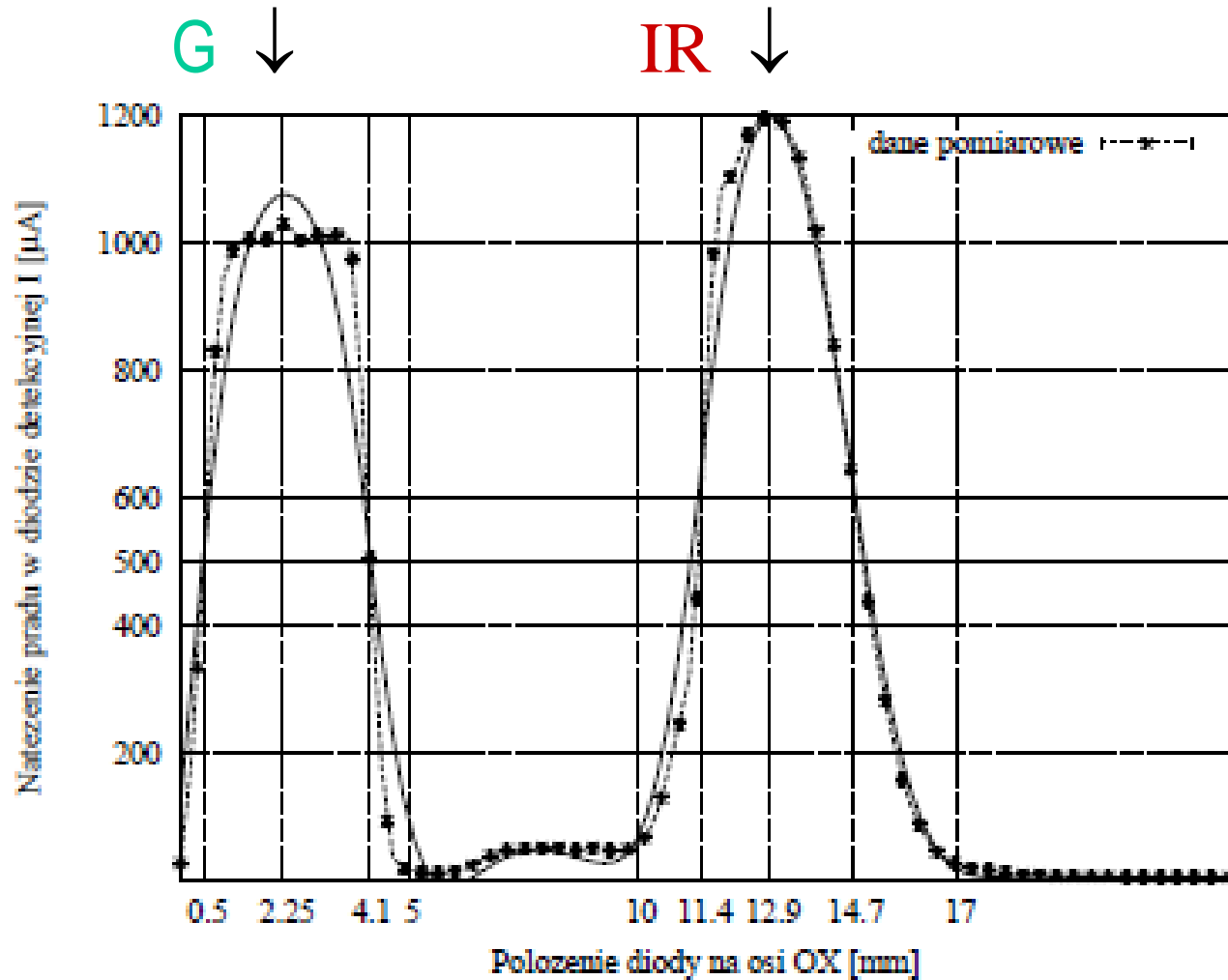
Pomiary:

- długości fali
- polaryzacji wiązki
- mocy wiązki i sprawności

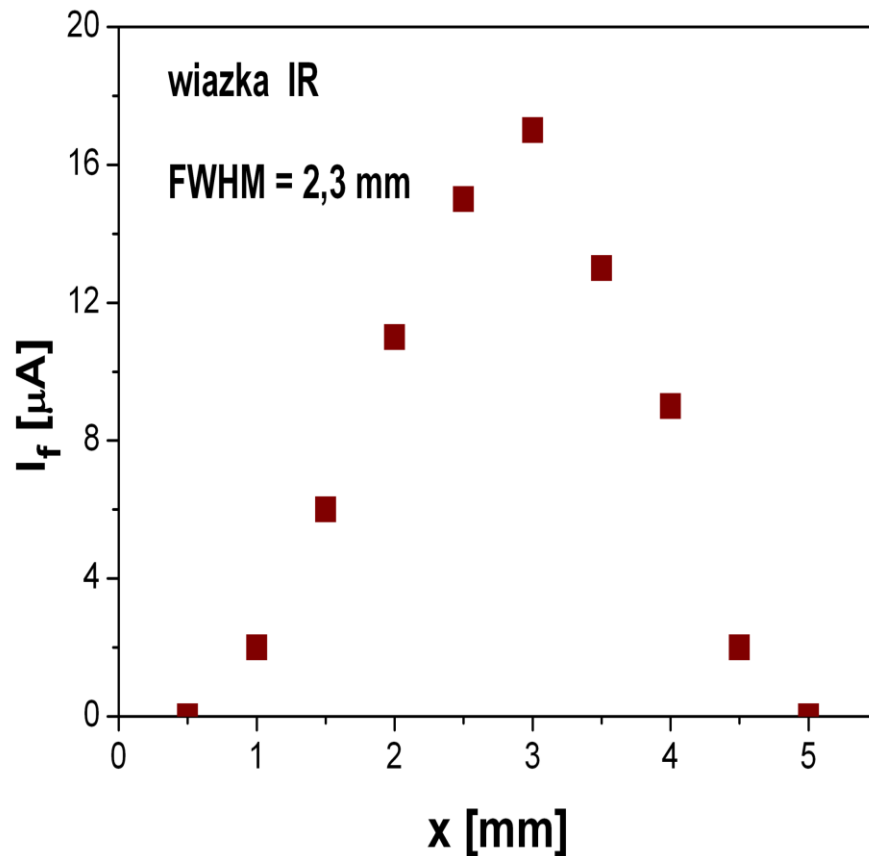
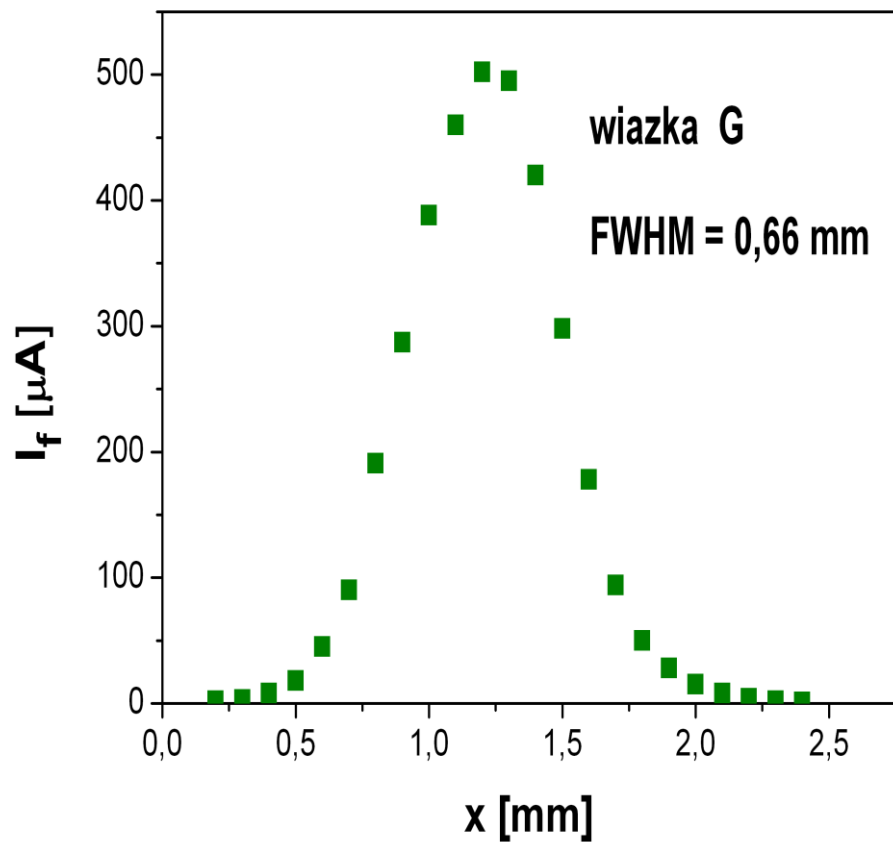
wykonać można tak samo, jak dla lasera półprzewodnikowego.

Co jest nowe:

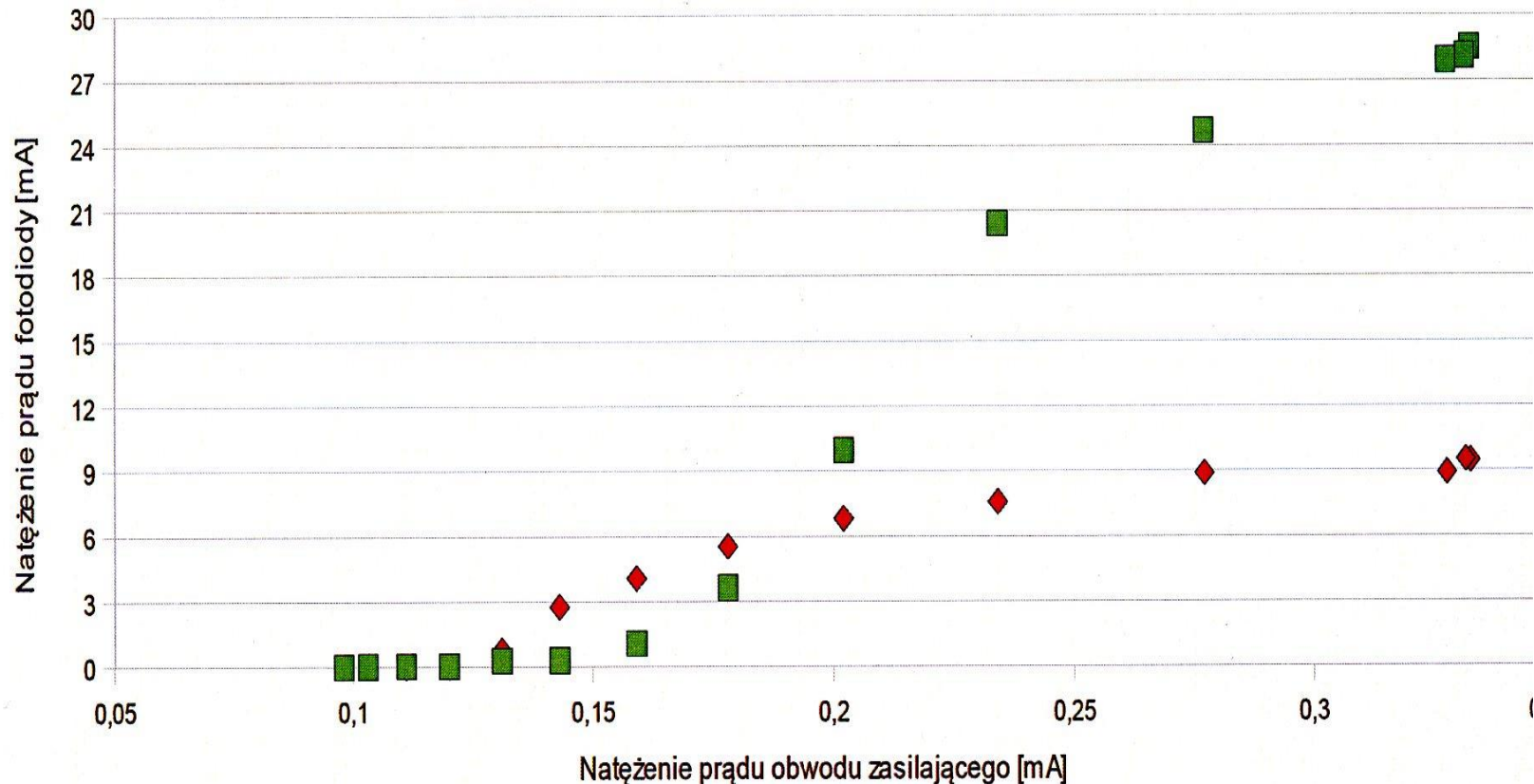
Badanie rozdzielania wiązek zielonej i podczerwonej (skan bez kolimatora)



Pomiar szerokości wiązek z wykorzystaniem kolimatora



Pomiar natężenia światła w funkcji prądu lasera – osobno dla wiązki G oraz IR. Różny charakter $I_{f,IR}(I)$ oraz $I_{f,G}(I)$ jest pośrednim dowodem nieliniowego zjawiska podwojenia częstotliwości



Uwagi dot. ćwiczeń z laserami (1):

- Prawie wszystkie eksperymenty (poza badaniem progu akcji laserowej) – w zakresie fizyki klasycznej, *ergo* nadają się dla innych wydziałów.
- Tematyka ćwiczeń porusza szereg zagadnień ogólnych, dotyczących nie tylko laserów:
 - siatka dyfrakcyjna
 - prawo Malusa
 - sprawność konwersji energii
 - definicja szerokości piku

Uwagi dot. ćwiczeń z laserami (2):

- Dla zapewnienia sprawnego wykonania:
 - zasilacze wtyczkowe (3V lasery, 9V fotodiody), małe i bez elementów regulacyjnych
 - regulacja prądu przy pomocy opornika dekadowego
 - mierniki tablicowe z pojedynczym zakresem
 - większość elementów podpisana
 - niezawodne wtyczki udostępnione przez KFCiD

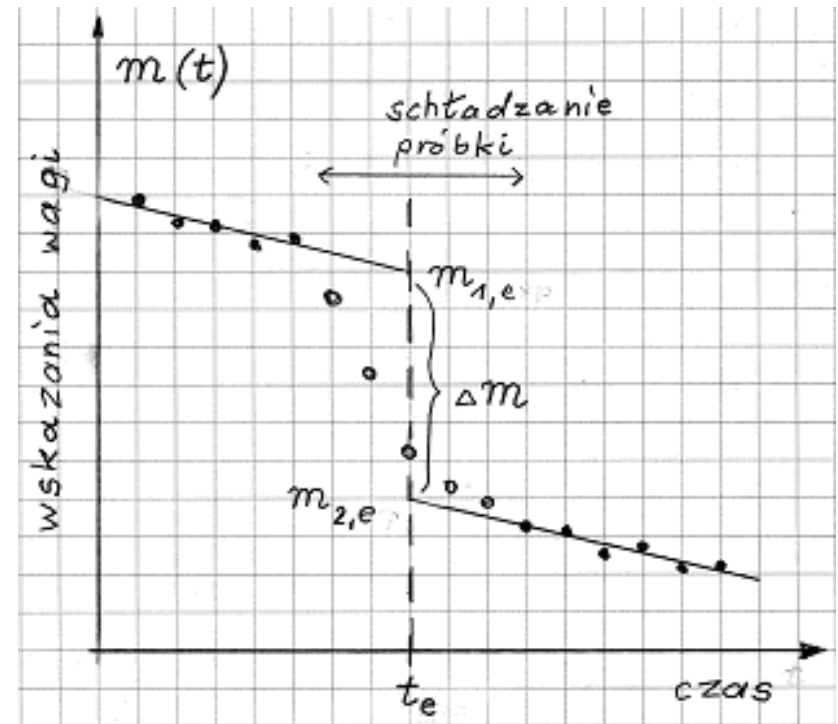
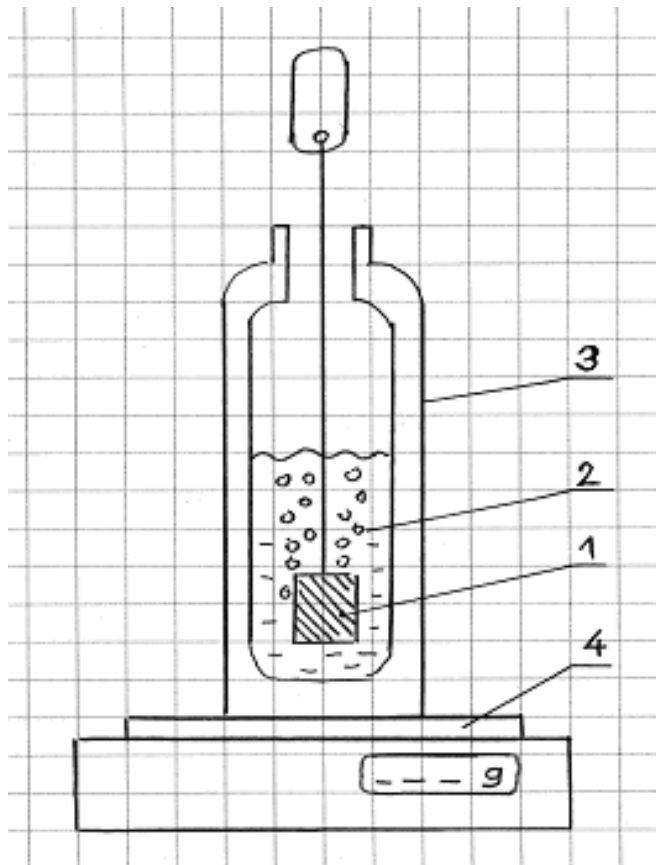
Podziękowania (ćwiczenia z laserami):

- dr. Zofia Sanok – inspiracja dawnym ćwiczeniem „Właściwości wiązki laserowej”
- Prof. Wojciech Gawlik (IF UJ) – pierwsze info o zasadzie działania lasera typu „zielony wskaźnik”
- dr. Anna Wnęk – przeznaczenie dwóch stanowisk na (szczupłej) powierzchni Pracowni
- dr Jacek Nizioł – polarymetr oraz przesuw mech.
- inż. Andrzej Skalski – wszechstronna pomoc techniczna

Ćwiczenie 5
w Pracowni Fizyki Ciała Stałego:

**Pomiar średniego ciepła
właściwego i wyznaczenie
temperatury Debye'a**

A. Pomiar średniego ciepła właściwego w zakresie 77 K – 295 K



Obliczenia

- Ekstrapolowany ubytek masy azotu

$$\Delta m = m_{1,e} - m_{2,e}$$

- Średnie ciepło właściwe

$$\bar{c}_p m_x (T_2 - T_1) = \Delta m Q_p$$

- Ciepło molowe

$$\bar{c}_{p,mol} = \bar{c}_p \mu$$

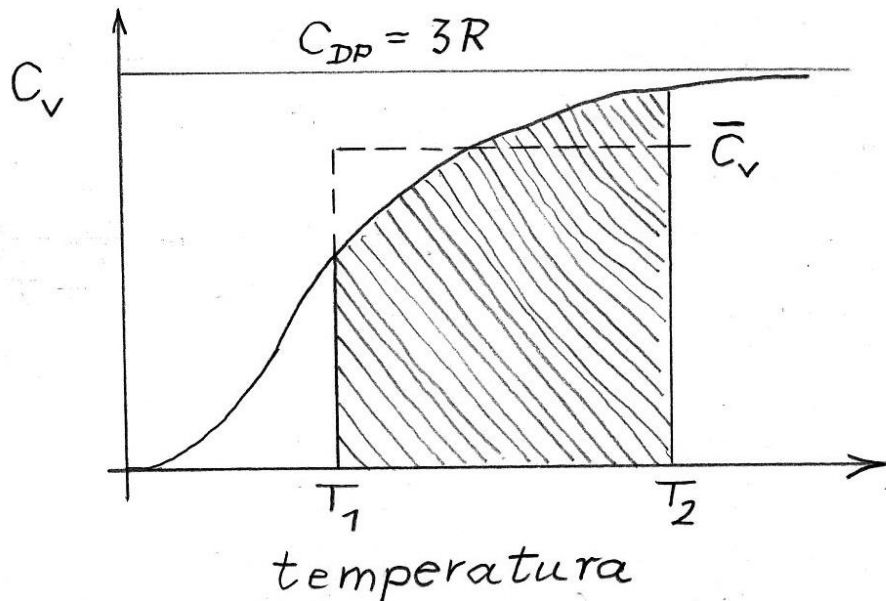
- Stosunek ciepła molowego do wartości $3R$ wynikającej z prawa Doulonga-Petita

$$\frac{\bar{c}_{p,mol}}{3R}$$

Próbki & przykładowe wyniki

próbka	T_D [K]	$\bar{c}_{p, mol} = \bar{c}_p \mu$	$\frac{\bar{c}_{V, mol}}{3R}$
Pb	87	25,56	1,025
Cd	221	19,31	0,774
Cu	310	22,65	0,908
Fe	373	15,46	0,620
Al	390	17,26	0,692
Si	692	12,70	0,509
SiC	\approx 1200	6,05	0,242
grafit	1550	3,88	0,155

B. Interpretacja: wyznaczanie temp. Debye'a



- klasyczna teoria Dulonga-Petita

$$c_V = 3R$$

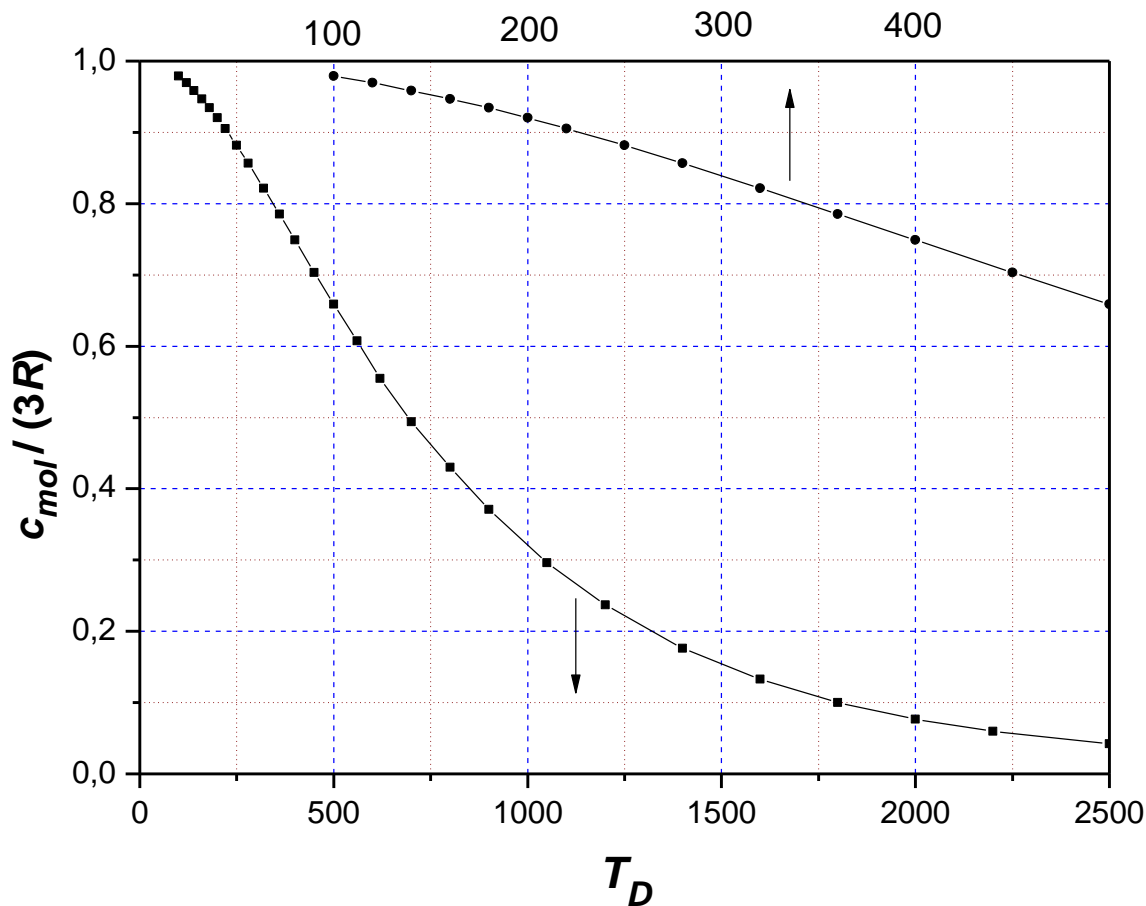
- kwantowa teoria Debye'a fononowego ciepła właściwego

$$c_V = 3Nk_B \cdot 3 \left(\frac{T}{T_D} \right)^3 \int_0^{T_D/T} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx$$

gdzie $T_D = \hbar\omega_D / k_B$

Krzywa cechowania z teorii Debye'a, $T_1=77\text{ K}$, $T_2=295\text{K}$

$$\left(\frac{c_{V, mol}}{3R}\right)_{teor} = \frac{3 \cdot T_2 \left(\frac{T_2}{T_D}\right)^3 \int_0^{T_D/T_2} \frac{x^3}{e^x - 1} dx - 3 \cdot T_1 \left(\frac{T_1}{T_D}\right)^3 \int_0^{T_D/T_1} \frac{x^3}{e^x - 1} dx}{T_2 - T_1}$$



Poprawki do teorii Debye'a

- **poprawka na izobaryczne warunki pomiaru**
(α - liniowa rozszerzalność termiczna, β - ściśliwość)

$$c_p - c_v = T V_{mol} \frac{(3\alpha)^2}{\beta}$$

- **elektronowe ciepło właściwe**

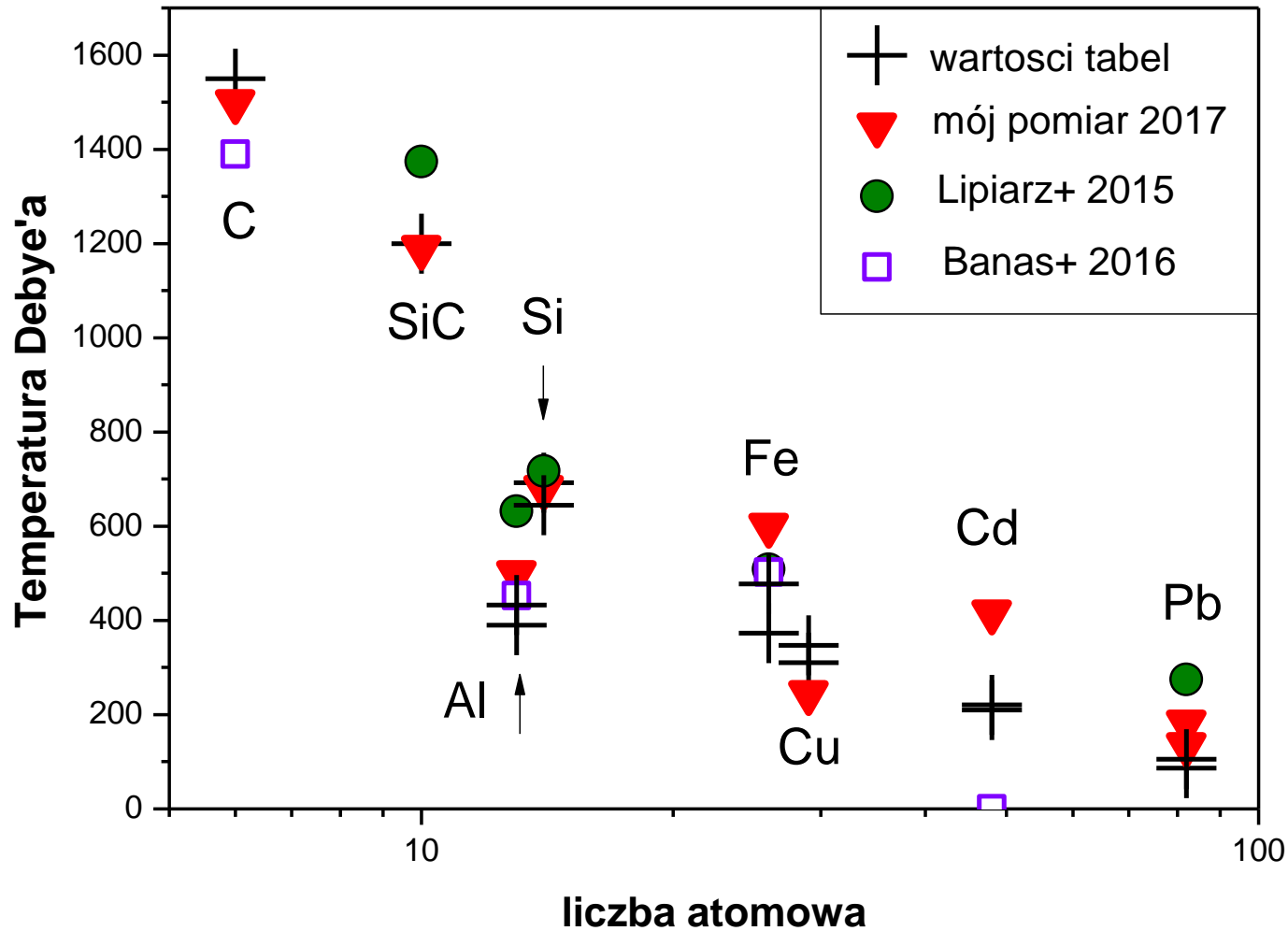
$$c_{el} = \gamma T$$

- **znaczenie poprawek (na przykładzie Pb):**

$$c_p - c_v = 4,1\% \times 3R$$

$$c_{el} = 2,2\% \times 3R$$

Zestawienie & interpretacja $\left(\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}\right)$



Zastosowanie w nauce: eksperyment testowy dotyczący wartości T_D dla różnych faz stopu Fe-Cr (dla prof. St. Dubiela)

- Faza α $c_{\text{mol}} = 19,7 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
- Faza σ $c_{\text{mol}} = 20,0 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$

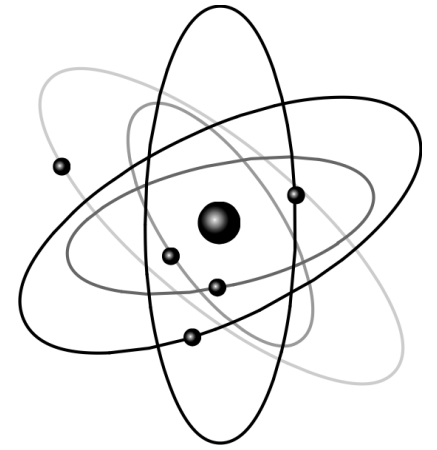
Wniosek (negatywny): w granicach niepewności
wartości T_D obydwu faz takie same

Konkluzje dot. omawianego ćwiczenia:

- proste w wykonaniu, bez pomiarów elektrycznych – stało się możliwe dzięki wynalazkowi wag elektronicznych
- w zakresie fizyki klasycznej – zaznajamia z podstawami kalorymetrii i kriogeniki
- w zakresie FCS – zaznajamia z teorią ciepła właściwego ciał stałych
- umożliwia pomiar znacznej liczby próbek
- dokładność wyznaczenia T_D wystarczająca

Podziękowania:

- Prof. St. Skrzypek (WIMiIP) – próbka SiC
- Dr. inż. Damian Rybiński – ustawienie ćwiczenia w Pracowni FCS (w tym zakup właściwej wagi) i krytyczne przeczytanie instrukcji



**Dziękuję za wysłuchanie
referatu**