

Ćwiczenie 4

Wpływ błędów pozycjonowania światłowodów na tłumienie złącz światłowodowych.

Cel ćwiczenia:

Celem ćwiczenia jest pomiar wpływu przemieszczeń wzdłuż osi, przemieszczeń poprzecznych i kątowych na efektywność transmisji mocy optycznej między łączonymi światłowodami włóknistymi.

Przebieg ćwiczenia:

1. zapoznanie się z możliwościami pomiarowymi stanowiska laboratoryjnego
2. przygotowanie światłowodów do pomiarów i sprzężanie promieniowania optycznego do włókna
3. pomiar mocy optycznej na wyjściu światłowodu nadawczego
4. pomiar mocy optycznej na wyjściu światłowodu odbiorczego w funkcji rozseparowania wzdłuż osi, przemieszczeń poprzecznych i kątowych łączonych światłowodów
5. obliczenie tłumienia połączeń światłowodowych w funkcji zadanych czynników zewnętrznych

Zagadnienia do przygotowania:

1. Sposoby przygotowywania powierzchni czołowych światłowodów do połączeń
2. Rodzaje połączeń światłowodowych i ich charakterystyka
3. Tłumienie złącza światłowodowego; definicja, jednostki, czynniki wpływające na poziom strat złącza światłowodowego

Przykładowa literatura:

- 1) Wykład „Światłowody”
- 2) B. Crosignani, G.de Marchis: „Światłowody w telekomunikacji”, WKiŁ, Warszawa 1987 r.
- 3) J.E.Midwinter: „Światłowody telekomunikacyjne”, WNT Warszawa 1983 r.
- 4) M Szustakowski: „Elementy techniki światłowodowej”, WNT Warszawa 1992r.
- 5) J.Siuzdak: „Wstęp do współczesnej telekomunikacji światłowodowej”, WKiŁ, Warszawa 1997 r.

POŁĄCZENIA ŚWIATŁOWODÓW WŁÓKNISTYCH

w celu połączenia dwu światłowodów należy zapewnić między nimi **kontakt optyczny**; umożliwić przekazywanie mocy optycznej między rdzeniami łączonych światłowodów – **sprzężenie czołowe**.

A. RODZAJE POŁĄCZEŃ MIĘDZY ŚWIATŁOWODAMI:

1. **POŁĄCZENIA STAŁE** : klejone, spawane (stosowane np. podczas montażu długich odcinków linii światłowodowych....)
2. **POŁĄCZENIA ROZŁĄCZNE** : złącza standardów ST, FC, S.C., E2000 (stosowane do podłączeń źródeł światła, detektorów przyrządów pomiarowych w liniach światłowodowych)

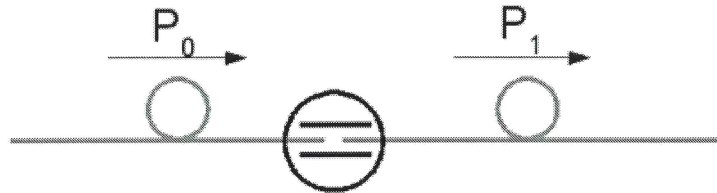
B. WYMAGANIA DOTYCZĄCE JAKOŚCI POWIERZCHNI CZOŁOWYCH ŁĄCZONYCH ŚWIATŁOWODÓW:

1. zwierciadlana płaskość,
2. prostopadłość do osi światłowodów
3. czystość

C. TECHNOLOGIE PRZYGOTOWYWANIA POWIERZCHNI CZOŁOWYCH

1. łupanie (obcinanie) światłowodów
2. szlifowanie i polerowanie

STRATY NA ZŁĄCZACH ŚWIATŁOWODOWYCH- DEFINICJA



$$L = 10 \log \frac{P_1 [mW]}{P_0 [mW]}$$

P_0 - moc optyczna mierzona przed złączeniem

P_1 - moc optyczna mierzona za złączeniem

Jednostka strat na złączu [dB]

Moc optyczna w technice światłowodowej określana jest w [dBm]

$$P[\text{dBm}] = 10 \log \left(\frac{P[\text{mW}]}{1\text{mW}} \right)$$

(moc optyczna odniesiona do 1mW mocy wejściowej)

MECHANIZMY STRAT NA ZŁĄCZACH ŚWIATŁOWODOWYCH

(Klasyfikacja)

1. STRATY ZEWNĘTRZNE (niesamoistne – związane z niedokładnościami pozycjonowania włókien światłowodowych)

- a) jakość powierzchni łączonych światłowodów
- b) przemieszczenia poprzeczne światłowodów (w kierunkach prostopadłych do osi światłowodów x, y)
- c) rozseparowanie światłowodów wzdłuż osi
- d) przemieszczenia kątowe (kąt między osiami światłowodów

2. STRATY WEWNĘTRZNE (samoistne - związane z jakością technologii wykonania włókna)

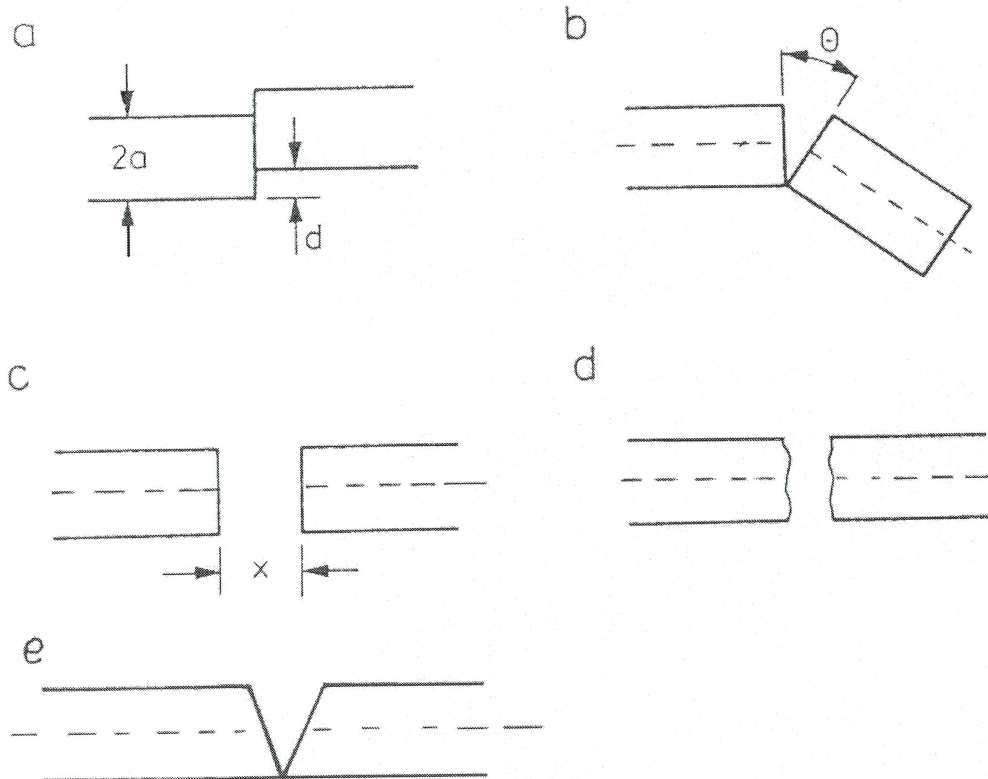
- a) różnice wymiarów geometrycznych (różnice promieni, rdzeni i płaszczy, łączonych światłowodów)
- b) różnice apertur numerycznych łączonych światłowodów
- c) różnice profilu współczynnika załamania łączonych światłowodów

3. STRATY ZWIĄZANE Z RODZAJEM POŁĄCZEŃ

STRATY ODBICIOWE – Fresnela – połączenia rozłączne,

STRATY ROZPROSZENIOWE – połączenia stałe (spawane, klejone)

AD.1 CZYNNIKI ZEWNĘTRZNE WPLYWAJĄCE NA STRATY MOCY OPTYCZNEJ NA ZŁĄCZACH ŚWIATŁOWODOWYCH

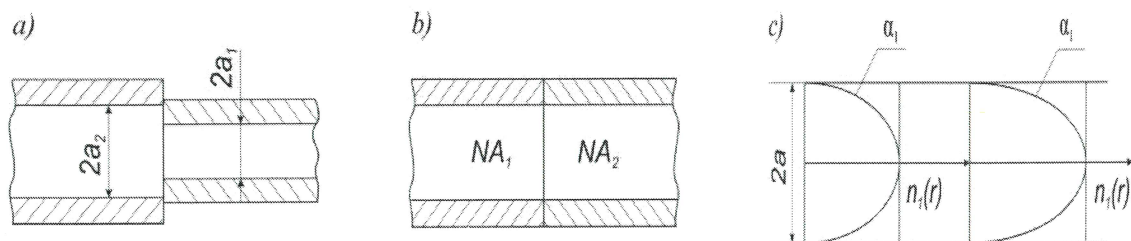


- a) przesunięcie w kierunkach poprzecznych względem osi światłowodów
- b) przemieszczenie kątowe osi łączonych światłowodów
- c) przesunięcie wzdłuż osi światłowodów (przerwa między światłowodami)
- d) jakość powierzchni czołowych (nierówności powierzchni czołowych i pochylenie kątowe powierzchni czołowych)
- e) odchylenie kątowe powierzchni czołowych

AD.2 CZYNNIKI WEWNĘTRZNE WPLYWAJĄCE NA STRATY MOCY OPTYCZNEJ NA ZŁĄCZACH ŚWIATŁOWODOWYCH

Są to straty wynikające z niedopasowania struktury i właściwości optycznych łączonych światłowodów:

- a) niedopasowanie średnic rdzeni łączonych światłowodów (a)
- b) niedopasowanie apertur numerycznych światłowodów (NA)
- c) niedopasowanie profili rozkładu współczynników załamania w rdzeniach światłowodów (α)



ŁĄCZNE STRATY SPOWODOWANE NIEDOPASOWANIEM PARAMETRÓW GEOMETRYCZNYCH I OPTYCZNYCH ŁĄCZONYCH ŚWIATŁOWODÓW

$$\alpha = 10 \log \left[\frac{a_1}{a_2} \right]^2 + 10 \log \left[\frac{NA_2}{NA_1} \right]^2 + 10 \log \left[\frac{(\alpha_1 + 2)\alpha_2}{(\alpha_2 + 2)\alpha_1} \right]$$

PRZYKŁADOWE WARTOŚCI STRAT wynikające z niedopasowania następujących parametrów : NA, a, α

| | NA ₁ | NA ₂ | a ₁ | a ₂ | α ₁ | α ₂ |
|--------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| α [dB] | 0,23 | 0,22 | 25 | 24 | 1,9 | 1,8 |
| | 0,33 | | 0,35 | | 0,12 | |

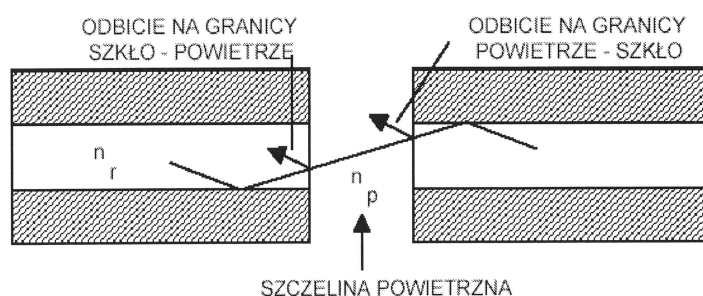
AD.3 STRATY ZWIĄZANE Z RODZAJEM POŁĄCZEŃ

STRATY FRESNELA

występują w połączeniach rozłącznych światłowodów

n_r – współczynnik załamania rdzenia

n_p – współczynnik załamania ośrodka wypełniającego przestrzeń między światłowodami (powietrze, lub ciecz immersyjna)

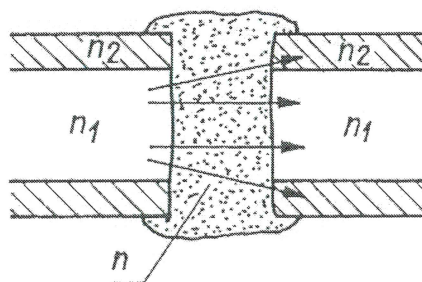


Straty Fresnela
$$P_F = -10 \log \left[1 - \left(\frac{n_r - n_p}{n_r + n_p} \right)^2 \right] \cdot 2$$

Dla przerwy powietrznej między dwoma światłowodami kwarcowymi $n = 1,456$ straty Fresnela wynoszą **0,32 dB**

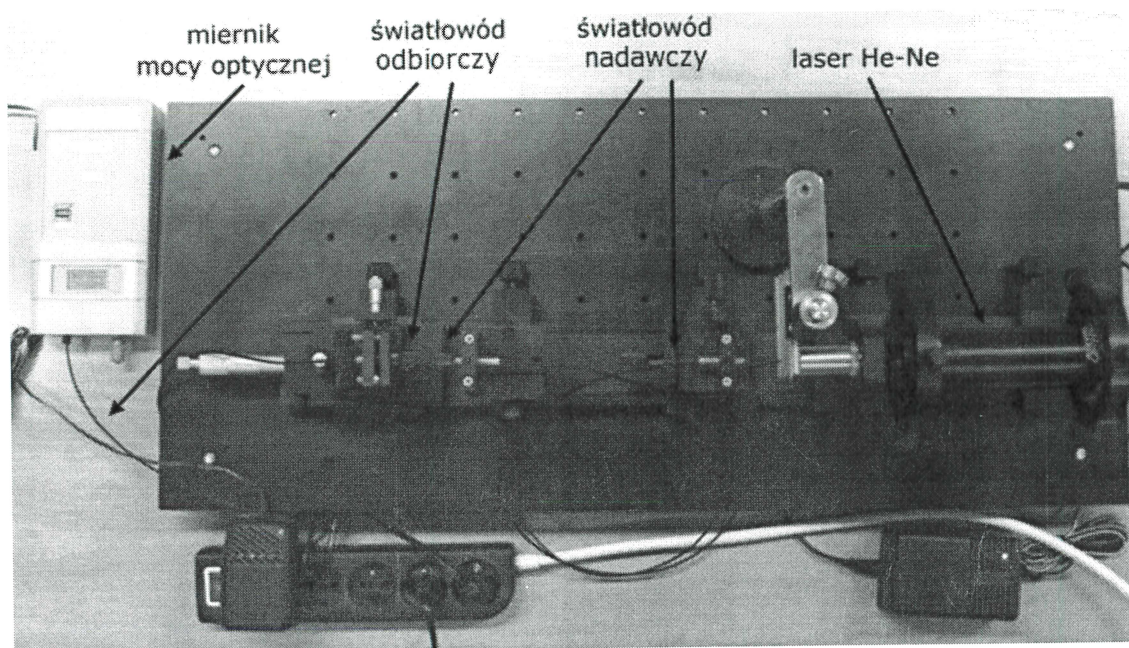
STRATY ROZPROSZENIOWE

występują w połączeniach stałych – rozproszenia na niejednorodnościach połączenia; tłumienie rzędu od 0,001 dB do 0,01dB



STANOWISKO DO POMIARU WPLYWU CZYNNIKÓW ZEWNĘTRZNYCH NA STRATY MOCY OPTYCZNEJ W ZŁĄCZU ŚWIATŁOWODOWYM

Na rys. 1 przedstawiono widok laboratoryjnego stanowiska do pomiaru strat mocy optycznej w złączu światłowodowym w funkcji wybranych czynników zewnętrznych.



Rys. 1. Stanowisko laboratoryjne do pomiaru strat mocy optycznej w modelu złącza rozłącznego

Badane złącze utworzone jest między dwoma światłowodami polimerowymi o średnicy rdzenia $960\ \mu\text{m}$ i średnicy płaszcza $1000\ \mu\text{m}$. Światłowod sprzężony z źródłem światła traktowany jest jako nadawczy, natomiast światłowod sprzężony z miernikiem mocy optycznej jako odbiorczy.

Źródłem światła w umawianym układzie pomiarowym jest laser He-Ne emitujący falę optyczną o długości $\lambda = 632.8\ \text{nm}$. Emitowana wiązka światła po przejściu przez obiektyw mikroskopowy i matówkę oświetla wejściową powierzchnię czołową światłowodu nadawczego. Zadaniem matówki jest równomierne oświetlenie powierzchni czołowej światłowodu w celu pobudzenia propagacji wszystkich modów w grubordzeniowym wielomodowym światłowodzie polimerowym. Po przejściu przez światłowod nadawczy wiązka świetlna pada na czołową powierzchnię wejściową światłowodu odbiorczego. W obszarze tym powstaje badane złącze rozłączne.

Należy zauważyć, iż czołową powierzchnię wejściową światłowodu odbiorczego można przemieszczać w trzech kierunkach liniowych natomiast przemieszczenia kątowe realizowane są przez światłowod nadawczy.

Zmierzone zmiany mocy optycznej posłużą do wyznaczenia strat dla złącza rozłącznego w funkcji: rozseparowania światłowodów wzdłuż osi - odległości między łączonymi włóknami, przemieszczeń poprzecznych względem osi światłowodów i przemieszczenia kąтового osi włókien (w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny stołu laboratoryjnego).

Długości światłowodów wykorzystanych do utworzenia modelu złącza światłowodowego są rzędu od 1.5 m do 2 m. Oznacza to, iż w obliczeniach strat złącza tłumienie włókien można pominąć, a mierzone zmiany sygnału optycznego spowodowane są jedynie przez zadawane czynniki zewnętrzne.

Laser He-Ne

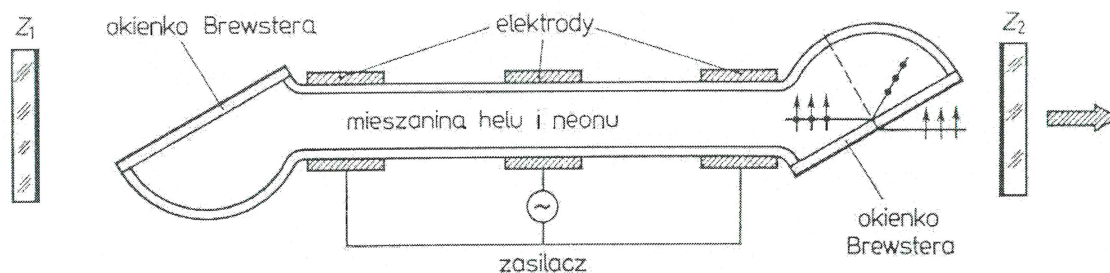
Laser (ang. *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* – wzmocnienie światła w wyniku wymuszonej emisji promieniowania) – to generator światła koherentnego (spójnego), czyli monochromatycznego i współfazowego. Wiązka laserowa charakteryzuje się wysoką gęstością mocy optycznej i małą rozbieżnością kątową wiązki. Może być również spolaryzowana.

Lasery zbudowane są z następujących elementów: ośrodek czynny (zachodzi w nim inwersja obsadzeń, a następnie akcja laserowa), rezonatora (wzmacnia określoną długość fali) oraz układu pompującego (doprowadza ośrodek czynny do inwersji obsadzeń). Cechą charakterystyczną ośrodka aktywnego jest występowanie tzw. stanów metastabilnych, na których elektrony powracające ze stanu wzbudzenia pozostają przez relatywnie długi czas (rzędu 10^{-6} – 10^{-8} sek.), zapewniając inwersję obsadzeń. Pompowanie ośrodka aktywnego w układzie rezonatora optycznego (interferometru) powoduje powstanie fali stojącej. W takich warunkach w ośrodku aktywnym (w odróżnieniu od większości materiałów) elektrony wzbudzonych atomów nie przechodzą ze stanu metastabilnego do stanu podstawowego w sposób spontaniczny lecz pod wpływem kwantów światła o stałej częstotliwości drgań. Zjawisku temu towarzyszy wymuszona emisja fotonu o częstotliwości i fazie drgań identycznych jak fotonu wzbudzającego, w wyniku czego fala stojąca ulega wzmocnieniu. Emisję spójnej i wzmocnionej wiązki świetlnej o wysokiej gęstości mocy umożliwia półprzezroczyste zwierciadło.

Laser helowo-neonowy (He-Ne) to gazowy, atomowy generator światła, w którym ośrodkiem aktywnym jest mieszanina gazów szlachetnych: helu (1 Tor) i neonu (0.1 Tor), szczelnie zamkniętych w szklanej lub kwarcowej rurze wyładowczej, na której końcach znajdują się zwierciadła płaskie (interferometr Fabry'ego-Perot'a), w tym jedno półprzepuszczalne, tworzące układ rezonatora optycznego (Rys. 1.). Odległość między zwierciadłami równa jest wielokrotności połowy długości wzmacnianej fali światła $\lambda/2$ (warunek powstania fali stojącej). Układem pompującym są elektrody zatopione w szklanej rurze. Przepływ prądu elektrycznego powoduje wyładowanie elektryczne i wzbudzenie He do stanu metastabilnego ($e + \text{He} \rightarrow \text{He}^* + e$). Wzbudzone atomy He^* w wyniku zderzeń niesprężystych z atomami Ne, powodują wzbudzenie tego ostatniego ($\text{He}^* + \text{Ne} \rightarrow \text{Ne}^* + \text{He}$) i emisję promieniowania ($\text{Ne}^* \rightarrow \text{Ne} + h\nu$). Cechą charakterystyczną lasera He-Ne jest polaryzacja liniowa emitowanej wiązki świetlnej, uzyskana w wyniku nachylenia zwierciadeł względem osi rury wyładowczej pod kątem Brewstera, tj. kątem dla którego padająca niespolaryzowana wiązka odbija się tylko jako składowa prostopadła do płaszczyzny padania (spolaryzowana). Wielokrotne odbicie wiązki między zwierciadłami zapewnia niemal stuprocentową polaryzację światła, co ma szereg zalet zarówno ze względu na działanie jak i zastosowania lasera He-Ne.

Najczęściej stosowane długości fali światła emitowanego z lasera He-Ne:

- $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ (światło czerwone),
- a także: 1152 nm, 2395 nm, 3391 nm (największe wzmocnienie).



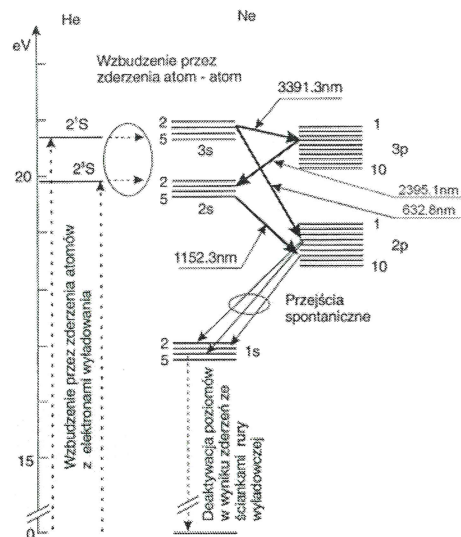
Rys. 1. Schemat budowy lasera He-Ne

W rzeczywistości zmiana ciśnienia gazów tworzących ośrodek aktywny, odległości zwierciadeł rezonatora, prądu wyładowania lub średnicy rury wyładowczej, umożliwia generację światła na blisko 30 liniach spektralnych w zakresie długości fali od $0.59\ \mu\text{m}$ do $3.39\ \mu\text{m}$. Sprawność lasera He-Ne jest rzędu 0.01-0.1%, a moc optyczna w zakresie 0.5–50 mW. Wiązka światła emitowanego ma średnicę 0.5–2 mm, a jej rozbieżność wynosi 0.5–2 mrad. Stabilność poziomu mocy optycznej jest rzędu 5%/h, zaś trwałość laserów He-Ne dochodzi do 20 000 godzin. Ze względu na stosunkowo niskie wzmocnienie światła na jednostkę długości (cecha charakterystyczna ośrodków rzadkich – gazowych) rurę wyładowczą lasera He-Ne wydłuża się ($> 10\ \text{cm}$), uzyskując zwiększenie mocy wyjściowej. Mimo niewielkich sprawności oraz niskich wzmocnień światła na jednostkę długości, wysoka monochromatyczność, dobra kolimacja oraz prostota konstrukcji sprawiają, że laser He-Ne jest chętnie stosowany w geodezji, holografii, justowaniu, w żyroskopach laserowych i wielu innych dziedzinach nauki i techniki.

Laser He-Ne był pierwszym na świecie działającym laserem gazowym. Skonstruowano go w Laboratoriach Bella w 1961 roku.

Mechanizm wzbudzenia w laserze He-Ne

Podczas wyładowania elektrycznego w szklanej rurze lasera, elektrony zderzają się z atomami He, wzbudzając je do stanów metastabilnych (2^1S lub 2^3S), wg wzoru: $e + \text{He}(1^1\text{S}) \rightarrow \text{He}(2^1\text{S}) \text{ lub } 2^3\text{S}) + e$. Hel może pozostawać w stanie metastabilnym nawet przez czas rzędu pojedynczych sekund, a energię wzbudzenia traci w wyniku zderzeń ze ściankami rury wyładowczej oraz zderzeń z atomami Ne, przekazując energię zgodnie z jednym ze wzorów: $\text{He}(2^1\text{S}) + \text{Ne} \rightarrow \text{He}(1^1\text{S}) + \text{Ne}(3s_2)$; $\text{He}(2^3\text{S}) + \text{Ne} \rightarrow \text{He}(1^1\text{S}) + \text{Ne}(2s_2)$. Stany wzbudzone He i Ne są niemal izoenergetyczne, dlatego przekazanie energii zachodzi praktycznie bez jej strat, jednak w stanach wzbudzonych atom Ne przebywa znacznie krócej (rzędu 10^{-7} - 10^{-8} sek.). Inwersja obsadzeń dla Ne zapewniona jest w wyniku tego, że stan $3s_2$ ma czas życia ok. 10^{-7} sekundy, zaś leżący niżej w skali energii stan $2p_4$ tylko 10^{-8} s. Przejście elektronu z $3s_2$ do $2p_4$ związane jest z emisją najbardziej znanej, czerwonej linii lasera He-Ne ($632,8\ \text{nm}$). Ze stanu $2p_4$ elektron przechodzi do stanów niższych w sposób spontaniczny, bez emisji promieniowania. Mechanizm wzbudzenia w laserze He-Ne przedstawiono na Rys. 2.



Rys. 2. Schemat poziomów energetycznych lasera He-Ne.
Pogrubionymi strzałkami oznaczono najważniejsze przejścia laserowe. [1]

Literatura:

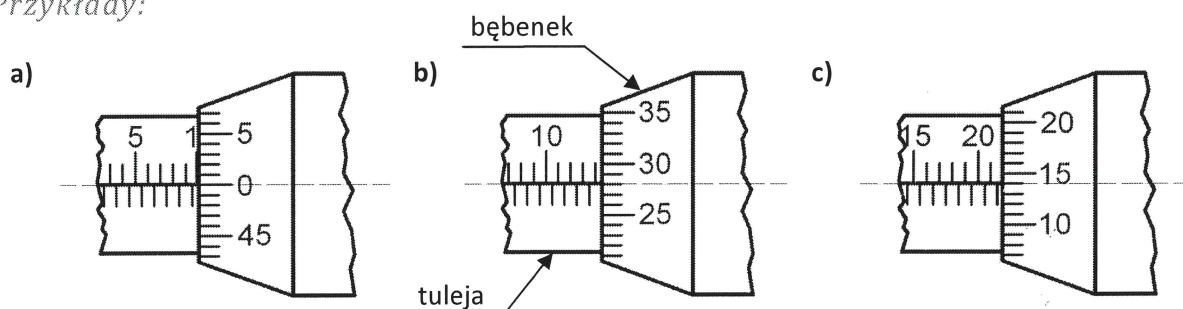
1. Bernard Ziętek, *Optoelektronika*, Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń, 2005
2. Ali Javan et al., *Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a He-Ne mixture*, Physical Review Letters, 6, 3, 1961, 106-110
3. Maksymilian Pluta, *Mikroskopia optyczna*, PWN, Warszawa, 1982

Śruba mikrometryczna

Odczyt położenia śruby mikrometrycznej określa się postępując wedle następujących instrukcji:

1. Odczytać na podziałce tulei mikrometru liczbę **pełnych milimetrów** (górne kreseczki) odsłoniętych przez brzeg bębna
2. Jeśli za ostatnią kresczką pełnych milimetrów widoczna jest dodatkowo kreseczka dolna, wówczas do wyniku dodać **0,5 mm**
3. Odczytać **setne części milimetra** z podziałki bębna, korzystając przy tym z linii podziałki znajdującej się na tulei mikrometru.

Przykłady:



Rys. 1. Wskazania śruby mikrometrycznej: a) 10 mm b) 14,28 mm c) 21,64 mm

- a) krawędź bębna znajduje się na dziesiątej, górnej kresce tulei mikrometru, więc mikrometr wskazuje **10 mm**
- b) widocznych jest **14** kresczek górnych (milimetrów), a podziałka bębna wskazuje **28 (+0,28 mm)**, dlatego przyrząd wskazuje **14,28 mm**
- c) oprócz **21** kresczek górnych (**21 mm**), widoczna jest dodatkowa kreseczka dolna (**+0,5 mm**), zaś podziałka bębna wskazuje **14 (+0,14 mm)**, więc mikrometr wskazuje: $21 + 0,5 + 0,14 =$ **21,64 mm**