

LABORATORIUM
METROLOGIA OPTYCZNA WŁASNOŚCI
MECHANICZNYCH

Instrukcja do ćwiczenia 4

ŚWIATŁOWODOWY CZUJNIK ODBICIOWY

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z właściwościami czujnika odbiciowego wykorzystującego promieniowanie lasera półprzewodnikowego w celu zastosowania go do pomiarów właściwości mechanicznych.

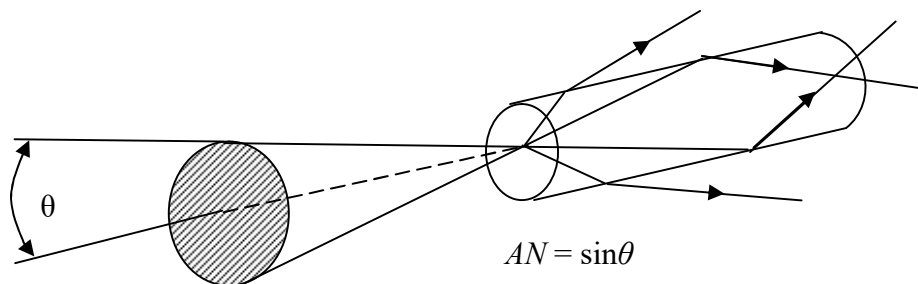
2. Czujnik światłowodowy

Czujnik światłowodowy może wykryć odkształcenia w konstrukcji mostów, kontrolować ruchy robota albo monitorować, czy pokonujący długie odległości kierowca nie zasypia. Jeszcze kilkanaście lat temu światłowody były wykorzystywane głównie do celów telekomunikacyjnych i opracowywane tak, aby były jak najmniej czułe na czynniki zewnętrzne. Dopiero niedawno zaczęto szukać nowych zastosowań dla światłowodów i zauważono, że mogą być one stosowane np. jako czujniki.

Transmisja fali świetlnej w falowodzie optycznym polega na utrzymaniu strumienia światła w rdzeniu falowodu. Rdzeń falowodu stanowi ośrodek optycznie przezroczysty o większym współczynniku załamania niż otoczenie rdzenia zwane płaszczem. Całkowite odbicie światła padającego pod kątem mniejszym od granicznego na powierzchni rozdziału rdzenia i płaszczka, stanowi podstawowe prawo fizyczne optycznej transmisji falowej.

W konstrukcji czujników światłowodowych używa się falowodów o przekroju kołowym rdzenia. Podstawowym materiałem światłowodów jest szkło, które mięknie ze wzrostem temperatury, utrzymując własności raczej ciała stałego niż cieczy. Lepkość szkła jest główną własnością umożliwiającą formowanie światłowodów. Czyste szkło kwarcowe otrzymuje się przez utlenienie czterochlorku krzemu w reakcji.

Tor promienia światła w rdzeniu włókna zależy od współczynnika załamania w płaszczyźnie przekroju poprzecznego włókna i kąta padania promienia względem powierzchni styku rdzeń-płaszcz. W światłowodzie mogą biec tylko te promienie, które padają pod określonym kątem do osi światłowodu. Krytycznej wartości kąta θ_{kr} odpowiada kąt akceptacji światłowodu. Wartość funkcji sinus tego kąta określa apertura numeryczna AN światłowodu skokowego.



Rys. 1. Akceptacja przez światłowód promieni światła wchodzących w stożek o kącie wierzchołkowym równym połowie kąta θ_{kr}

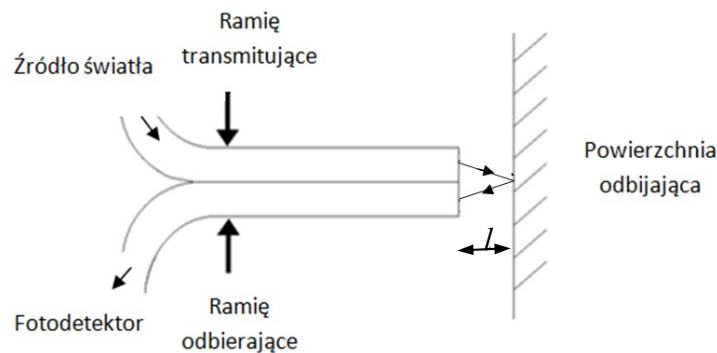
Wartości apertury numerycznej światłowodu warunkuje efektywność sprzężenia światłowodu ze źródłem światła, a zwłaszcza diodą elektroluminescencyjną (DEL) i laserem półprzewodnikowym. Dioda elektroluminescencyjna promieniuje praktycznie w przedziale

kata półpełnego. Aczkolwiek maksimum promieniowania przypada w sąsiedztwie normalnej do powierzchni, to jednak około połowy mocy zawiera się w stożku $\pm 30^\circ$ (kąt rozwarcia $\sim 60^\circ$). Wynika stąd nieuchronność strat sprzężenia, spowodowana różnicą wartości stożka akceptacji światłowodu i kąta rozwarcia promieniowania diody.

Natomiast kąty rozwarcia promieniowania laserów półprzewodnikowych są znacznie mniejsze i wynoszą od kilku do kilkudziesięciu stopni. Dlatego skuteczność sprzężenia laserów z włóknem optycznym jest znacznie lepsza.

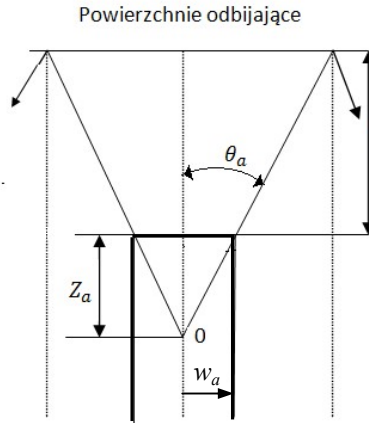
3. Przebieg ćwiczenia

Wiązka laserowa z lasera półprzewodnikowego wprowadzona jest do światłowodu poprzez soczewkę, a po wyjściu z tego światłowodu pada na powierzchnię lustrzaną. Światło laserowe odbite od tej powierzchni pada na drugi światłowód, którym wędruje do fotodetektora

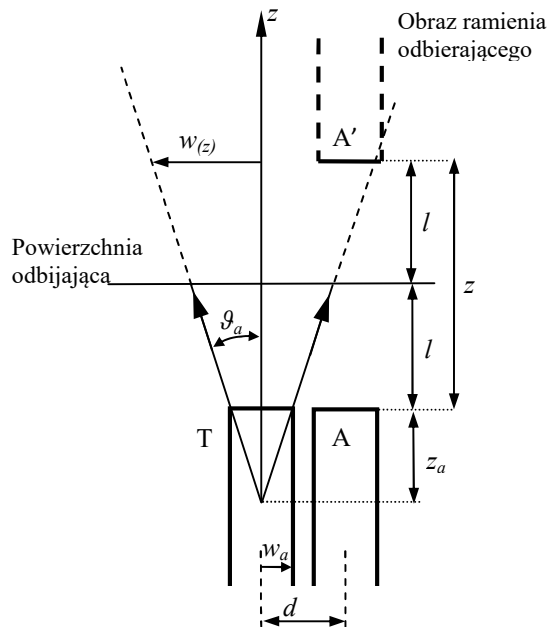


Rys. 2. Czujnik odbiciowy

Położenie l powierzchni odbijającej (lustra) zmieniamy począwszy od wartości zerowej, czyli światłowody w punkcie startowym dotykają lustra. Całkowitą moc promieniowania opuszczającego pierwszy światłowód oznaczamy przez P_0 , natomiast moc promieniowania wchodzącego do drugiego światłowodu – przez P . To, że moc P_0 jest mniejsza od mocy P , wynika z dwóch czynników. Po pierwsze czoło drugiego światłowodu, znajdujące się w pewnej odległości od pierwszego światłowodu, ma rozmiar mniejszy od szerokości wiązki światła w danym miejscu. Ponieważ szerokość wiązki o kącie rozwarcia 2θ jest coraz większa z odległością (Rys. 3), to coraz mniejszy procent światła emitowanego przez pierwszy światłowód pada na drugi światłowód. Czynnikiem ten stanowi powszechną przyczynę zmniejszania się natężenia oświetlenia wraz z odległością od źródła światła. Po drugie, osie obu równoległych światłowodów znajdują się w pewnej odległości d od siebie (Rys. 4). Oczywiście d jest większa od sumy promieni rdzeni obu światłowodów. Dlatego, dla bliskich odległości l , nie całe czoło rdzenia drugiego światłowodu jest oświetlone przez wiązkę światła wychodzącą z rdzenia pierwszego światłowodu.



Rys. 3. Stożek świetlny utworzony przez ramię transmitujące



Rys. 4. Położenie ramienia odbierającego A i jego obrazu A' w stożku świetlnym utworzonym przez ramię transmitujące T

Jeżeli rdzeń światłowodu ma średnicę dużo większą od długości fali (światłowód wielomodowy), to rozkład natężenia w zależności od odległości r od osi wiązki dla światła opuszczającego światłowód jest w przybliżeniu stały dla $r < w_{(z)}$ i równy zero dla $r > w_{(z)}$. Wtedy natężenie oświetlenia dla $r < w_{(z)}$ w dowolnym punkcie wiązki światła emitowanego przez pierwszy światłowód określamy z jego definicji dzięki zależności:

$$I_{(z)} = \frac{P_e}{\pi w_{(z)}^2} \quad (1)$$

gdzie: P_e – moc promieniowania, $w_{(z)}$ – promień podstawy stożka świetlnego zależny od odległości $z=2l$, określony z zależności:

$$w_{(z)} = w_a + 2l \operatorname{tg} \theta_a \quad (2)$$

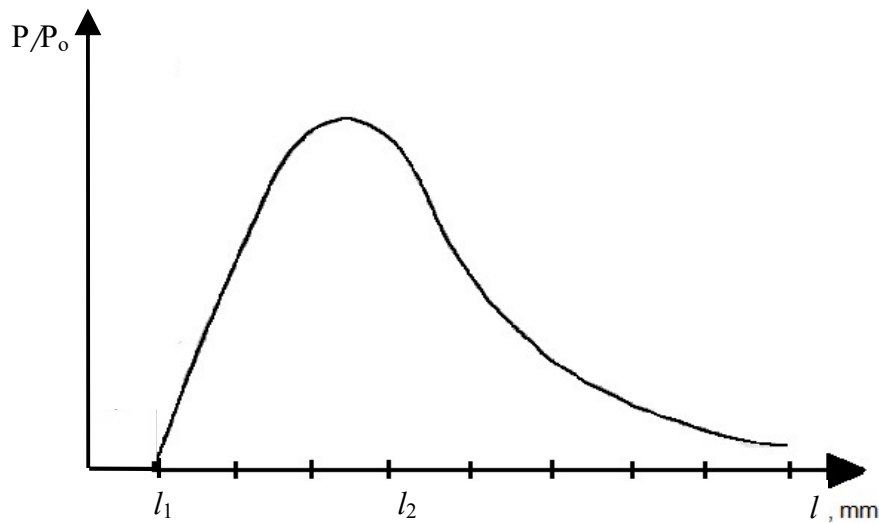
Kąt akceptacji θ_a obliczamy mając dane: współczynnik załamania rdzenia n_1 , współczynnik załamania płaszcza n_2

$$NA = \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3)$$

Odbierany sygnał optyczny określamy dzięki wzorowi (1) z zależności:

$$P_{(z)} = I_{(z)} S_{(z)} = P_e \frac{S_{(z)}}{\pi w_{(z)}^2} \quad (4)$$

gdzie $S_{(z)}$ jest powierzchnią czoła światłowodu odbierającego oświetloną przez stożek świetlny.



Rys. 5. Charakterystyka przetwarzania

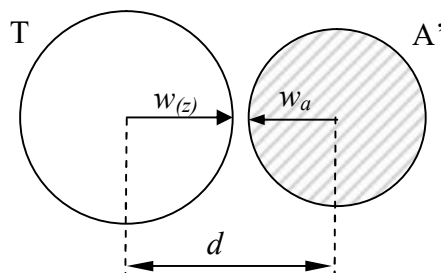
Charakterystyka przetwarzania (Rys. 5) to zależność mocy świetlnej P pochłanianej przez odbierający światłowód od odległości l światłowodów od powierzchni odbijającej. Często moc P jest odniesiona do mocy P_0 promieniowanej przez światłowód transmitujący. Da się zauważyć tutaj trzy zakresy.

I. Pierwszy zakres, $l < l_1$, występuje dla

$$w_{(z)} < d - w_a \quad (5)$$

Obraz A' ramienia odbierającego A znajduje się na tyle blisko ramienia transmitującego T (Rys. 4), że stożek świetlny o promieniu $w_{(z)}$ nie obejmuje czoła obrazu ramienia odbierającego (Rys. 6). Wtedy odbierany sygnał optyczny $P_{(z)}$ określamy dzięki wzorowi (4) z zależności:

$$S_{(z)} = 0 \quad P_{(z)} = 0 \quad (6)$$

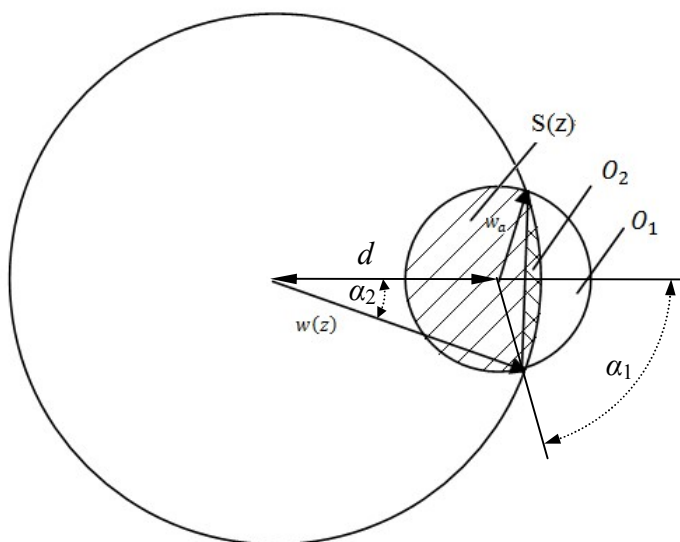


Rys. 6. Stożek świetlny nie oświetla czoła ramienia odbierającego

II. Drugi zakres, $l_1 < l < l_2$ na Rys. 5, występuje dla

$$d - w_a < w_{(z)} < d + w_a. \quad (7)$$

Obraz A' ramienia odbierającego A znajduje się w takiej odległości l od ramienia transmitującego T (Rys. 4), że stożek świetlny o promieniu $w_{(z)}$ częściowo obejmuje czoło obrazu ramienia odbierającego (Rys. 7). W tym zakresie przeważa powiększanie się oświetlonej części powierzchni czołowej $S_{(z)}$ obrazu ramienia odbierającego wraz z odległością. Wpływ zmniejszania się natężenia oświetlenia $I_{(z)}$ wraz z odległością jest mniejszy (wzór (4)).



Rys. 7. Stożek świetlny o promieniu $w_{(z)}$ nie w pełni oświetla ramię odbierające w_a

W tym przypadku oświetlaną powierzchnię $S_{(z)}$ obliczamy z zależności:

$$S_{(z)} = \pi w_a^2 - O_1 + O_2 \quad (8)$$

W celu obliczenia pól odcinków kół O_1 i O_2 najpierw obliczamy kąty α_1 i α_2 :

$$\cos \alpha_1 = \frac{w_{(z)}^2 - d^2 - w_a^2}{2 d w_a} \quad (9)$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{w_{(z)}^2 + d^2 - w_a^2}{2 d w_{(z)}} \quad (10)$$

Pole odcinka O_1 na kole o promieniu w_a obliczamy z zależności:

$$O_1 = \frac{\pi w_a^2 2\alpha_1}{360} - \frac{w_a^2 \sin 2\alpha_1}{2} \quad (11)$$

Pole odcinka O_2 na kole o promieniu $w_{(z)}$ obliczamy z zależności:

$$O_2 = \frac{\pi w_{(z)}^2 2\alpha_2}{360} - \frac{w_{(z)}^2 \sin 2\alpha_2}{2} \quad (12)$$

Odbierany sygnał optyczny można obliczyć dzięki wzorowi (4) z zależności :

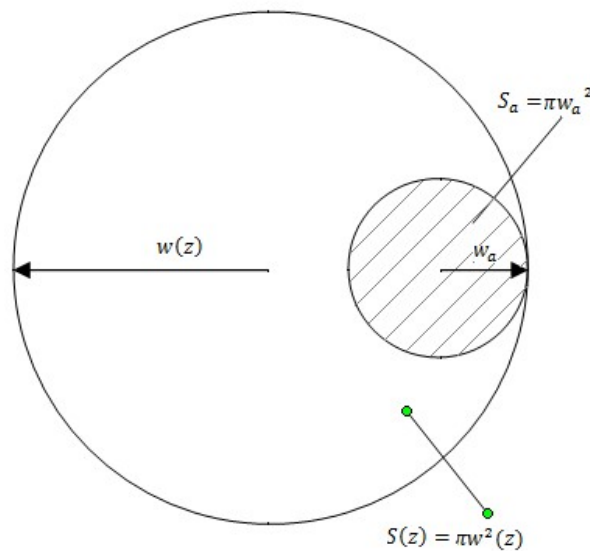
$$P_{(z)} = P_e \frac{S_{(z)}}{\pi w_{(z)}^2} \quad (13)$$

III. Trzeci zakres, $l > l_2$ na Rys. 5, występuje dla

$$w_{(z)} > d + w_a . \quad (14)$$

Obraz A' ramienia odbierającego A znajduje się w takiej odległości od ramienia transmitującego T (Rys. 4), że stożek świetlny o promieniu $w_{(z)}$ całkowicie obejmuje czoło obrazu ramienia odbierającego (Rys. 8). W tym zakresie na odbieraną moc P wpływa zmniejszanie się natężenia oświetlenia $I_{(z)}$ wraz z odległością l , wzór (4). Wtedy odbierany sygnał optyczny określamy z następujących zależności:

$$S_{(z)} = S_a = \pi w_a^2 \quad P_{(z)} = P_e \frac{\pi w_a^2}{\pi w_{(z)}^2} \quad (15)$$



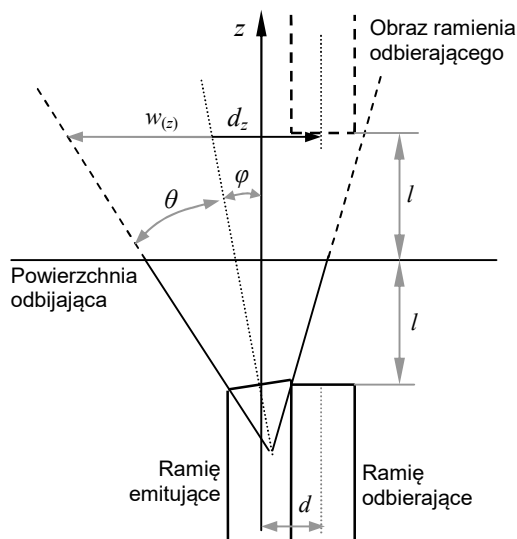
Rys. 8. Stożek świetlny w pełni oświetla czoło ramienia odbierającego

Jak widać ze wzoru (15), moc $P_{(z)}$ zależy hiperbolicznie od odległości l , ponieważ jedyną zmienną w tym wzorze jest $w_{(z)}$, które zależy liniowo od l .

Przypadki alternatywne (nieobowiązkowe)

Czasami zdarza się, że oś wiązki świetlnej jest skierowana pod kątem φ do osi światłowodów, Rys. 9. Odległość osi obrazu ramienia odbierającego od osi wiązki świetlnej, oznaczana w powyższych wzorach przez d , powinna być zastąpiona przez

$$d_z = d + 2 \cdot l \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (16)$$



Rys. 9. Położenie ramienia odbierającego w stożku świetlnym odchylonym o kąt φ

Zupełnie inaczej można obliczyć moc światła $P_{(z)}$ odbieraną przez drugi światłowod w przypadku, gdy wiązka emitowana przez pierwszy światłowod ma gaussowski (a nie jednostajny) rozkład natężenia w zależności od odległości r od jej osi:

$$I_{(r)} = \frac{2P_e}{\pi w_{(z)}^2} e^{-\frac{2r^2}{w_{(z)}^2}} \quad (17)$$

Wtedy można dosyć dokładnie przybliżyć całkę z natężenia światła po polu powierzchni czoła ramienia odbierającego zakładając, że natężenie na całym polu czoła jest stałe i równe prawdziwemu natężeniu $I_{(r)}$ w środku tego czoła, czyli dla $r=d$. Moc światła $P_{(z)}$ będzie wtedy równa

$$P_{(z)} = I_{(d)} \cdot \pi w_a^2 = 2P_e \frac{\pi w_a^2}{\pi w_{(z)}^2} e^{-\frac{2r^2}{w_{(z)}^2}} \quad (18)$$

4. Określenie parametrów charakterystyki przetwarzania czujnika

a. Graniczne odległości l_1 i l_2

Według wzoru (7) graniczna odległość l_1 występuje, gdy

$$d - w_a = w_{(z)}. \quad (19)$$

Po podstawieniu zależności (2) otrzymujemy

$$l_1 = \frac{\frac{1}{2}d - w_a}{\operatorname{tg} \vartheta}. \quad (20)$$

Także według wzoru (7) graniczna odległość l_2 występuje, gdy

$$w_{(z)} = d + w_a. \quad (21)$$

Po podstawieniu zależności (2) otrzymujemy

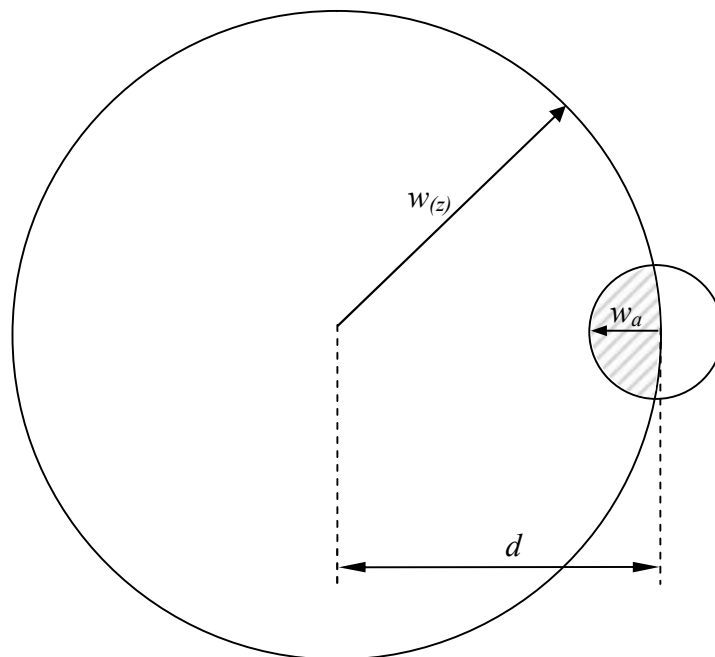
$$l_2 = \frac{\frac{1}{2}d}{\operatorname{tg} \vartheta}. \quad (22)$$

Różnica obu tych odległości daje

$$l_2 - l_1 = \frac{w_a}{\operatorname{tg} \vartheta}. \quad (23)$$

b. Moc odbierana w środku drugiego przedziału charakterystyki przetwarzania

Sytuacja dla średniej odległości $l_{\text{sr}} = \frac{1}{2}(l_1 + l_2)$ jest przedstawiona na Rys. 10.



Rys. 10. Stożek świetlny oświetla w przybliżeniu połowę czoła ramienia odbierającego

Istotnie, jak widać z rysunku, $w_{(z)} = d$, co po podstawieniu zależności (2) daje

$$l = \frac{d - w_a}{2 \operatorname{tg} \vartheta}, \quad (24)$$

a po skorzystaniu z zależności (22) i (23) daje

$$l = \frac{l_1 + l_2}{2} = l_{sr}. \quad (25)$$

Moc świetlna odbierana wtedy przez światłowód odbiorczy zgodnie ze wzorem (4) i (2) jest w przybliżeniu równa

$$P_{(z)} = P_e \frac{S_{(z)}}{\pi w_{(z)}^2} \approx P_e \frac{\frac{1}{2} \pi w_a^2}{\pi (w_a + 2l_{sr} \operatorname{tg} \vartheta)^2} = P_e \frac{\frac{1}{2} \frac{w_a^2}{\operatorname{tg}^2 \vartheta}}{\left(\frac{w_a}{\operatorname{tg} \vartheta} + 2l_{sr} \right)^2}, \quad (26)$$

co po wstawieniu zależności (23) i (25) daje

$$P_{(l=l_{sr})} = P_e \frac{(l_2 - l_1)^2}{8l_2^2}. \quad (27)$$

5. Wykonanie ćwiczenia

Najpierw sprawdzamy działanie układu pomiarowego doprowadzając do uzyskania odpowiedniego napięcia na detektorze. Następnie zmieniamy odległość l rozpoczynając od minimalnej z krokiem dobranym przez prowadzącego. Odczytujemy wskazania detektora, wyniki pomiarów zapisujemy w tabelce (choćby detektor mierzy moc odbieraną, to wynik przetwarza na napięcie w miliwoltach).

Opracowanie sprawozdania:

1. Wykonujemy wykres mocy świetlnej P na detektorze w funkcji odległości l .

Moc P (na podstawie napięcia z tabelki) traktujemy jako bezwymiarową.

2. Następnie wybieramy punkty leżące w zakresie liniowości (w drugim przedziale odległości l , $l_1 < l < l_2$ na Rys. 5) i dopasowujemy prostą $P = a \cdot l + b$. Kryterium dopasowania jest uzyskanie współczynnika korelacji większego od 0,998. Oznacza to, że wybranych punktów powinno być jak najwięcej, ale jednak współczynnik korelacji musi być większy od powyższej wartości, co świadczy o tym, że punkty bardzo dobrze wpasowują się w linię prostą. **Należy napisać, które punkty wybrano.** Na podstawie wyników dopasowania, a i b , określamy czułość i zakres pomiarowy badanego czujnika. Czułość określa się jako wzrost mocy detektora w zakresie liniowości odniesiony do wzrostu odległości, przy którym się dokonał $\Delta P / \Delta l$. Zakres pomiarowy czujnika odległości to jego zakres liniowości Δl .

3. W następnym etapie wyliczamy teoretycznie charakterystykę tego czujnika. Do dopasowania parametrów obliczeń teoretycznych używamy punktów pomiarowych leżących w okolicy środka zakresu liniowości. W tym celu, najpierw znajdujemy graniczne wartości l_1 i l_2 . Odległość l_1 wyznaczamy z przecięcia znalezionej linii prostej z osią l . Natomiast odległość l_2 znajdujemy z wykresu jako wartość l , dla której wykres położony za maksimum przegina się i przechodzi w hiperbolę (zgodnie z uwagą poniżej wzoru (15)).

Należy napisać, jaką odległość l_2 wybrano.

Dzięki odległościom granicznym l_1 i l_2 oraz zależnościom (22) i (23) znajdujemy parametry d i w_a , wcześniej obliczywszy kąt akceptacji światłowodu ze wzoru (3) dla danych współczynników załamania rdzenia i płaszczka.

Moc P_e emitowaną przez pierwszy światłowód (transmitujący) obliczamy ze wzoru (27), wcześniej wyznaczywszy moc odbieraną $P(l=l_{sr})$ ze znalezionego równania prostej dla $l=l_{sr}$.

4. Wykonujemy wykres teoretycznej charakterystyki czujnika $P(l)$. Moc P obliczamy dla każdego z zakresów omówionych w podpunktach I, II i III punktu 3 (wzory 6, 13, 15).

5. Wyniki porównania obu charakterystyk, własne spostrzeżenia i uwagi zapisujemy we wnioskach.