

**Andriej Fiedorowicz Kotyuk
Jan Owsik**

**Wzorce
jednostki mocy
i energii
promieniowania
laserowego**

AKADEMIA OBRONY NARODOWEJ



*Tą drogą, za zaszczerpieie metrologicznego
bakcyła, podziękowania składa oraz dalszych
owocnych lat służby najukochańskiej metrologii
drogiemu Profesorowi życzy wdzięczny uczeń
Jan OWSIK.*

AKADEMIA OBRONY NARODOWEJ



Andriej Fiedorowicz Kotyuk
Jan Owsik

Wzorce
jednostki mocy
i energii
promieniowania
laserowego

Warszawa 2007

Recenzenci:
Prof. dr hab. Aleksander B. Szymański
Dr hab. inż. Jerzy Pisarek

Projekt graficzny okładki i stron tytułowych
Dariusz Łysio

Redaktor
Teresa Piątek

Redaktor techniczny
Beata Klarowska

Zdjęcia
Marcin Mamajek

Korekta techniczna
Jolanta Puchalska
Małgorzata Sęktas

© Copyright by Andriej Fiedorowicz Kotyuk, Jan Owsik, Warszawa 2007

© Copyright by Akademia Obrony Narodowej, Warszawa 2007

ISBN 978-83-89423-89-4

Sygn. AON 5807/07

Skład, druk i oprawa: Akademia Obrony Narodowej – Wydział Wydawniczy
00-910 Warszawa, al. gen. A. Chruściela 103, tel. 681-40-55, tel./faks 681-37-52
Zam. nr 119/2007

SPIS TREŚCI

WSTĘP	7
ROZDZIAŁ 1. POMIARY I METROLOGIA	10
1.1. Pojęcia podstawowe	10
1.2. Rodzaje i metody pomiaru	13
1.3. Środki pomiaru	14
1.4. Wyniki pomiarów i ich dokładność	14
ROZDZIAŁ 2. ODTWARZANIE SKALI JEDNOSTEK RADIOMETRYCZNYCH W TECHNICIE LASEROWEJ	19
2.1. Kalorymetr jako wzorzec jednostki mocy średniej i energii promieniowania laserowego	19
2.1.1. Układ odtwarzania jednostki mocy i energii promieniowania laserowego i przekazania ich wielkości w Stanach Zjednoczonych	19
2.1.2. Systemy odtwarzania jednostek energetycznych promieniowania laserowego i przekazania ich wielkości w Chinach	25
2.2. Kriogeniczny radiometr absolutny jako wzorzec jednostek mocy średniej i energii promieniowania laserowego	26
2.2.1. Charakterystyka kriogenicznych radiometrów absolutnych	26
2.2.2. System odtwarzania jednostek mocy i energii promieniowania laserowego i pomiaru ich parametrów w Niemczech	26
2.2.3. Pierwotny radiometr laserowy małych i średnich poziomów	27
2.2.4. Rozszerzenie zakresu pomiarowego	28
2.2.5. Zabezpieczenie powtarzalności pomiarów energii promieniowania laserowego	28
2.3. Wzorzec jako zestaw pomiarowy	29
2.3.1. Zabezpieczenie powtarzalności pomiarów promieniowania laserowego mocy średniej i energii w Rosji	29
2.3.2. Wzorzec pierwotny jednostki mocy średniej promieniowania laserowego (WPMS)	29
ROZDZIAŁ 3. SYSTEM ZABEZPIECZENIA METROLOGICZNEGO TECHNIKI LASEROWEJ	33
3.1. Łańcuch porównań w metrologii promieniowania laserowego	33
3.2. Wzorzec pierwotny w metrologii promieniowania laserowego	39
3.3. Odbiorniki pułapkowe	42
3.4. Przetworniki pomiarowe wzorców mocy i energii promieniowania laserowego	44
3.5. Przyrządy pomiarowe	49
ROZDZIAŁ 4. WZORCE SYSTEMU ODTWARZANIA SKALI JEDNOSTEK RADIOMETRYCZNYCH W TECHNICIE LASEROWEJ	50
4.1. Wzorzec jednostki mocy średniej i energii promieniowania laserowego	50
4.1.1. Przesłanki opracowania wzorca	50
4.1.2. Schemat wzorca	51
4.1.3. Zasada odtworzenia i przekazania wielkości jednostki mocy średniej	53
4.1.4. Zasada odtworzenia i przekazania wielkości jednostki energii	54
4.1.5. Badania metrologiczne wzorca pierwotnego	55
4.2. Wzorzec jednostki energii impulsowego promieniowania laserowego	57
4.2.1. Schemat wzorca, wybór sposobu odtworzenia wielkości jednostki energii	57

4.2.2. Zasada działania wzorca jednostki energii	60
4.2.3. Badania metrologiczne wzorca wtórnego	61
4.3. Wzorzec wata dla dużych poziomów mocy promieniowania laserowego	63
4.3.1. Przesłanki opracowania wzorca	63
4.3.2. Schemat wzorca	64
4.3.3. Kalibracja przetwornika pomiarowego wzorca	66
4.3.4. Wielkość jednostki mocy	67
4.3.5. Dzielnik promieniowania na siatce dyfrakcyjnej	68
4.3.6. Charakterystyki metrologiczne wzorca	69
ROZDZIAŁ 5. WZORCE PRZENOŚNE MOCY I ENERGII	
PROMIENIOWANIA LASEROWEGO	71
5.1. Układy przenośnego wzorca mocy promieniowania laserowego	71
5.1.1. Układ pomiarowy stanowiska z zastosowaniem dzielnika promieniowania	71
5.1.2. Układ stanowiska pomiarowego wzorca z zastosowaniem polaryzacyjnego dzielnika promieniowania laserowego	71
5.1.3. Układ stanowiska pomiarowego wzorca z zastosowaniem modulatora akustyczno-optycznego	72
5.1.4. Schemat stanowiska pomiarowego wzorca z zastosowaniem dzielnika promieniowania laserowego zbudowanego na bazie siatki dyfrakcyjnej	74
5.1.5. Schemat stanowiska pomiarowego wzorca z zastosowaniem układu pomiaru względnej mocy	75
5.2. Wzorzec przenośny mocy ciągłego promieniowania laserowego	77
5.3. Układy przenośnego wzorca energii impulsowego promieniowania laserowego	82
5.3.1. Układ pomiarowy stanowiska z zastosowaniem siatki dyfrakcyjnej	82
5.3.2. Układ pomiarowy stanowiska z zastosowaniem płytki światłodzielącej i kontrolnego przyrządu pomiarowego	84
5.4. Wzorzec przenośny energii impulsywnego promieniowania laserowego	85
5.4.1. Charakterystyka wzorca	85
5.4.2. Wybór systemu sterowania, rejestracji i obróbki wyników pomiarów	88
5.4.3. Opis schematu funkcjonalnego	88
ZAKOŃCZENIE	90
BIBLIOGRAFIA	93

WSTĘP

Rozwój techniki laserowej i rozszerzanie obszarów jej zastosowań w różnych dziedzinach powodują jednoczesny rozwój i opracowanie nowych przyrządów kontroli i pomiaru charakterystyk i parametrów promieniowania laserowego. Wykonanie nowych i eksploatacja już istniejących przyrządów z nieprzerwanymi rosnącymi wymaganiami co do dokładności pomiarów wymaga prawidłowego funkcjonowania i ciągłego rozwijania systemu spójności pomiarowej charakterystyk energetycznych i parametrów promieniowania laserowego. Parametrami tymi są (zgodnie z rekomendacją ISO) moc średnia ciągłego i energia impulsowego promieniowania laserowego. Spójność pomiarową tych dwóch wielkości energetycznych gwarantuje **system kontroli metrologicznej, który zawiera wzorce wielkości jednostek mocy i energii promieniowania laserowego.**

Współczesne wzorce jednostek mocy średniej i energii promieniowania laserowego zawierają następujące elementy:

- źródło promieniowania laserowego,
- optykę ogniskującą,
- wzorcowe przetworniki pomiarowe wejściowych wielkości optycznych w wyjściowe wielkości elektryczne,
- urządzenia obróbki informacji pomiarowej i jej przetworzenia w najbardziej wygodną dla operatora postać.

Podczas wykonywania wzorcowych stanowisk pomiarowych, w zależności od zakładanej dokładności charakterystyk wyjściowych wzorca, należy prawidłowo wybrać jego schemat strukturalny, algorytm funkcjonowania, program obróbki otrzymanej informacji oraz sterowania całym układem. Dotychczas zadania te rozwiązywano intuicyjnie na podstawie zakładanych wymagań i zgromadzonego doświadczenia eksperymentalnego. Jednakże konieczność dalszego podwyższania dokładności pomiarów i wykonywania automatycznych zestawów pomiarowych do kalibracji unowocześnianych przyrządów pomiarowych stymuluje rozwój programowego podejścia do opracowania wzorców jednostek energetycznych promieniowania laserowego.

Podczas odtwarzania skali jednostek radiometrycznych w technice laserowej należy dążyć do minimalizacji błędu systematycznego wyniku pomiarów. Jedną z efektywnych dróg uniknięcia błędów systematycznych jest unifikacja schematów strukturalnych wzorców wchodzących w skład systemu spójności pomiarowej. Stąd wynika konieczność optymalizacji struktury wzorca, opracowania algorytmu programu obróbki informacji i sterowania wszystkimi procesami zachodzącymi z wykorzystaniem zunifikowanych struktur wzorców o różnych dokładnościach.

Wzrost praktycznych zastosowań promieniowania laserowego i jego znaczenia dla światowego rynku sprawia, że wymagają one nie tylko ciągłego udoskonalania samych systemów i urządzeń laserowych, dokładnej znajomości parametrów i charakterystyk promieniowania laserowego, ale także stałego doskonalenia metod i przy-

rządów pomiarowych, pozwalających z wymaganą dokładnością dokonywać pomiaru wszystkich wielkości fizycznych, jak również układów odpowiadających za charakterystyki wyjściowe systemów laserowych. Istnieje przy tym tendencja do wprowadzania międzynarodowej standaryzacji metod, środków i metodyk wykonywania pomiarów parametrów i charakterystyk wyjściowych promieniowania laserowego. Całością tych przedsięwzięć przyjęto nazywać laserometrią.

Do tego rodzaju pomiarów stosuje się systemy zapewniające zgodność pomiarów z konkretnymi metodami ich realizacji i oceną dokładności otrzymanych wyników.

Źródła promieniowania laserowego w istotny sposób różnią się parametrami od konwencjonalnych źródeł światła stosowanego do oświetlania. Wśród różnic wymienić można:

- monochromatyczność, która pozwala w wielu przypadkach na uniknięcie konieczności korekcji, spowodowanej zależnością parametrów sygnału wychodzącego od długości fali;
- wysoki stopień koherencji, która powoduje pojawienie się interferencji i struktury speklowej przy wykorzystaniu elementów optycznych;
- wysoki i nierównomierny rozkład gęstości mocy w przekroju poprzecznym wiązki promienia laserowego, która charakteryzuje się specyficznymi właściwościami w porównaniu z wiązką promieniowania stosowaną w przetwornikach pomiarowych, a mianowicie:
 - liniowość w szerokim zakresie zmian,
 - równomierność rozkładu współczynnika przetwarzania w zależności od miejsca padania promienia laserowego na powierzchnię odbiorczą;
- wysoki poziom mocy wyjściowej, w związku z czym wykonanie pomiaru wymaga rozproszenia jej na powierzchni odbiornika przetwornika pomiarowego w celu uniknięcia zniszczenia jego powierzchni i elementów;
- polaryzację promieniowania, która może doprowadzić do nieadekwatności reakcji przetwornika pomiarowego w zależności od jego kształtu lub występowania w jego składzie elementów optycznych.

Ta specyfika promieniowania laserowego wymaga opracowania i skonstruowania układu odtwarzania i przekazania wielkości jednostki, różniącego się od układu stosowanego w pomiarach parametrów światła źródeł konwencjonalnych używanych do oświetlenia.

Podręcznik stanowi omówienie tematyki wzorców wielkości jednostki mocy i energii promieniowania laserowego. W pierwszym rozdziale scharakteryzowano podstawowe pojęcia i określenia z zakresu pomiarów i metrologii. Rozdział drugi zawiera opis dwóch możliwych podejść do odtwarzania skali jednostek radiometrycznych w technice laserowej. Rozpatrzono tu typowe rozwiązania konstrukcyjne wzorców jednostek energetycznych promieniowania laserowego, bazujących na wykorzystaniu radiometrów lub kalorymetrów absolutnych promieniowania. W trzecim rozdziale przedstawiono ewolucję krajowego systemu zabezpieczenia metrologicznego techniki laserowej od niezbędnego minimum lat 90. XX wieku do jego wersji współczesnej, zawierającej osiągnięcia nauki i techniki XXI wieku.

W dwóch ostatnich rozdziałach opisano stacjonarne przerośnię wzorce krajowego systemu odtwarzania skali jednostek radiometrycznych w technice laserowej.

Podręcznik kierowany jest do czytelnika znającego podstawy optyki, techniki laserowej, a zwłaszcza podstawy metrologii. Będzie przydatny nie tylko studentom wyższych lat studiów oraz studiów podyplomowych, ale również pracownikom naukowym i dydaktycznym mającym styczność z technikami wykorzystującymi lasery.

POMIARY I METROLOGIA

1.1. Pojęcia podstawowe

W procesie poznawania otaczającego świata ważne znaczenie mają oceny ilościowe, które dają możliwość poznania działających w przyrodzie zależności. W procesie tym mamy do czynienia z pomiarami wielkości fizycznych. Pomiary te zajmują szczególne miejsce wśród różnych rodzajów oszacowań ilościowych. Ich wyróżniającą cechą jest określenie jednoznacznego związku między mierzonymi wielkościami fizycznymi i ich liczbowymi odpowiednikami (co można uważać za wstępną definicję pojęcia pomiaru).

Pomiar należy rozpatrywać z trzech punktów widzenia: technicznego, metrologicznego i poznawczego.

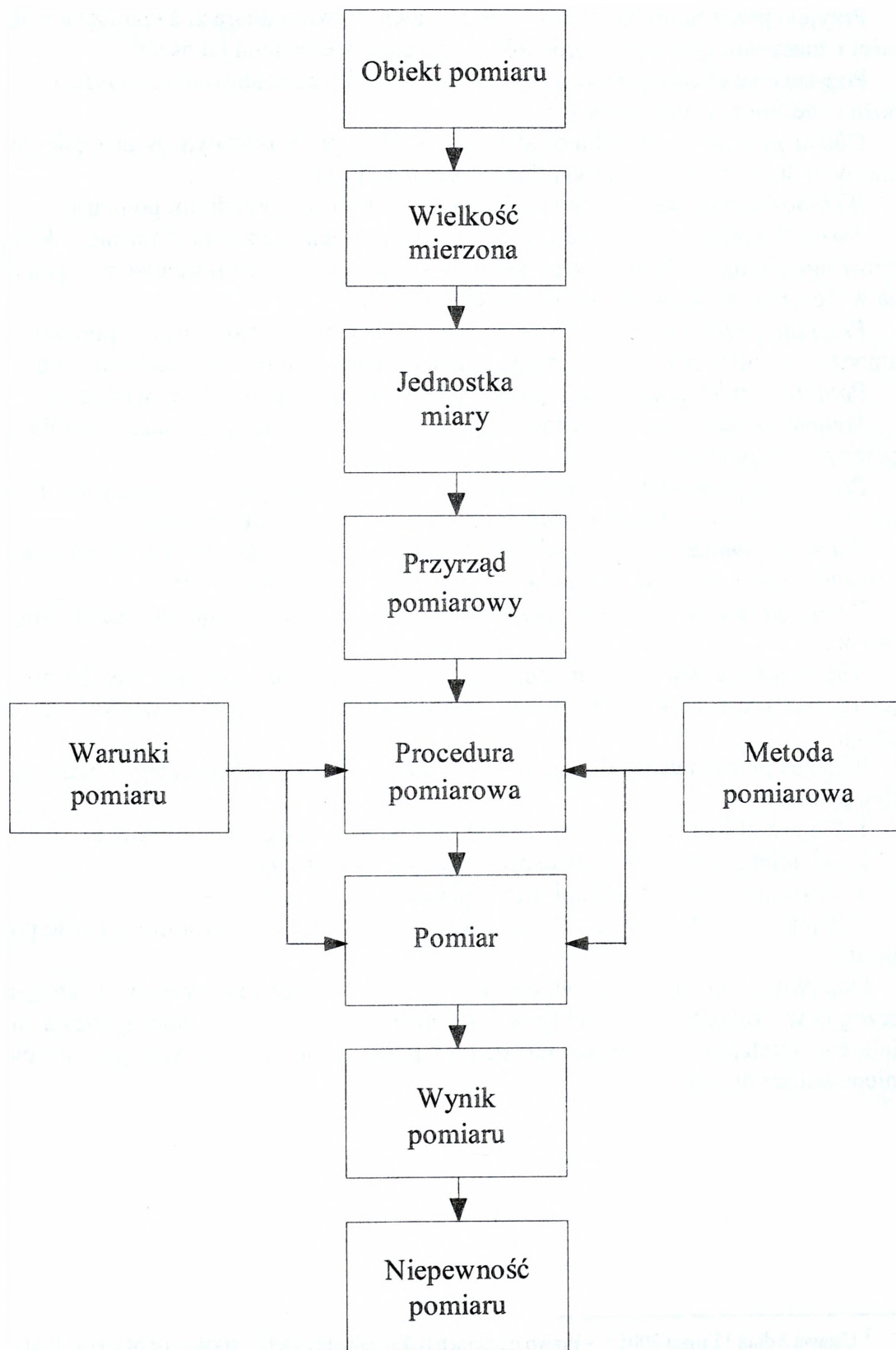
1. Strona techniczna pomiaru polega na opracowaniu procedury użycia urządzenia pomiarowego.

2. Sens metrologiczny polega na porównaniu mierzonej wielkości fizycznej z jej jednostką, której wymiar został przekazany od wzorca do urządzenia pomiarowego.

3. Aspekt poznawczy natomiast można sformułować następująco: celem pomiaru jest otrzymanie wartości wielkości mierzonej z dokładnością, która nie przewyższa zadanego przedziału.

W metrologii jako nauce o pomiarach podstawowe znaczenie ma pojęcie miary, o której Mendelejew powiedział: *Nauka zaczyna się od momentu rozpoczęcia pomiaru. Dokładna nauka nie ma sensu bez miary*. Miara, z którą można porównać wymiar wielkości mierzonej, wyróżnia pomiar od innych postaci oceny ilościowej. Ponadto pomiar charakteryzuje się obiektywnością, ponieważ jest realizowany za pomocą specjalnie przeznaczonych dla tego celu urządzeń pomiarowych. Często pomiary są przeprowadzane z dokładnością znajdującą się na granicy możliwości współczesnej nauki i techniki. Do pomiarów z zadaną dokładnością wybiera się szybko działające urządzenia pomiarowe, ustala warunki pomiarów oraz realizuje procedurę zapewniającą jednolitość działań. Urządzenia pomiarowe są kalibrowane, a wyniki pomiarów wyrażane w ustalonych jednostkach. Podczas pomiarów wielkości fizycznych jest określana niepewność pomiaru, co daje możliwość oceny jakości wyniku pomiaru. Warto mieć na względzie również znaczenie wyniku pomiaru. Znaczenie wyniku pomiaru określa całokształt wymagań, wnoszonych w jakość pomiarów. Przez to pojęcie rozumie się zbiór cech warunkujących zgodność środków, metody, procedury, warunków pomiaru i stanu jednolitości pomiarów z wymaganiami zadania pomiarowego¹.

¹ Polska Norma PN-EN 28402 *Jakość. Terminologia*, Wydawnictwo normalizacyjne ALFA, Warszawa 1993.



Rys. 1.1. Podstawowe elementy procesu pomiarowego

Przyjęta przez Sejm RP w 2001 roku ustawa Prawo o miarach świadczy o ważności i znaczeniu tych trzech procesów w procesie sterowania jakością².

Podstawowe elementy procesu pomiarowego, które przedstawiono na rysunku 1.1, można zdefiniować następująco³:

Obiekt pomiaru – przedmiot studiów, badań i prób, o którym w procesie pomiarów należy otrzymać wiarygodną informację ilościową.

Wielkość mierzona – wielkość określona, stanowiąca przedmiot pomiaru.

Jednostka miary – wielkość określona, zdefiniowana i przyjęta umownie, z którą porównuje się inne wielkości tego samego rodzaju w celu ich ilościowego wyrażania w stosunku do tej wielkości przyjętej umownie.

Przyrząd pomiarowy – urządzenie przeznaczone do wykonywania pomiarów, samodzielnie lub w połączeniu z jednym lub z wieloma urządzeniami dodatkowymi.

Pomiar – zbiór operacji mających na celu wyznaczenie wartości wielkości.

Metoda pomiarowa – logiczny ciąg operacji wykonywanych podczas pomiaru, opisanych w sposób ogólny.

Procedura pomiarowa – zbiór operacji opisanych w sposób szczegółowy i realizowanych podczas wykonywania pomiarów zgodnie z daną metodą.

Warunki pomiaru – warunki, dla których wielkości mające wpływ na pracę przyrządów pomiarowych znajdują się w zakresach dopuszczalnych.

Wynik pomiaru – wartość przypisana wielkości mierzonej, uzyskana drogą pomiaru.

Niepewność pomiaru – parametr związany z wynikiem pomiaru, charakteryzujący rozrzut wartości, które można w uzasadniony sposób przypisać wielkości mierzonej.

Podczas przeprowadzania pomiarów należy odpowiedzieć na cztery fundamentalne pytania:

1. Co jest obiektem mierzonym i jakie wielkości podlegają pomiarowi?
2. Jak mierzyć, tzn. jaką zastosować metodę pomiarową?
3. Czym mierzyć, tzn. jakimi przyrządami pomiarowymi?
4. Z jaką dokładnością jest wykonywany pomiar, tzn. jaka jest niepewność pomiaru?

Odpowiedź na pierwsze pytanie jest zawarta w rozdziale drugim, w którym szczegółowo rozpatrzono obiekty w laserometrii. Natomiast w dalszej części niniejszego rozdziału omówiono określenia i pojęcia dotyczące metod, przyrządów i niepewności pomiaru.

² Ustawa z dnia 11 maja 2001 r. – Prawo o miarach (tekst jednolity DzU z 2004 r., nr 243, poz. 2441).

³ Międzynarodowy słownik podstawowych i ogólnych terminów metrologii, wyd. polskie, Główny Urząd Miar, Warszawa 1995.

1.2. Rodzaje i metody pomiaru

Sposób otrzymania wartości wielkości mierzonej decyduje o rodzaju pomiaru, czy jest on bezpośredni czy pośredni.

Pomiarem bezpośrednim nazywamy pomiar, w którym wszystkie obliczenia prowadzące do wyniku pomiaru są wykonywane wewnątrz przyrządu lub urządzenia pomiarowego.

Pomiarem pośrednim jest pomiar, w którym obliczenia prowadzące do wyniku pomiaru są wykonywane na zewnątrz przyrządu lub systemu pomiarowego przez człowieka bezpośrednio bądź za pomocą kalkulatora lub komputera.

Z analizy procesów pomiarowych wynika, że wartość wielkości mierzonej można znaleźć po jej przetworzeniu w inną. Oznacza to, że najprostsze pomiary są przeprowadzane drogą przetwarzania wielkości mierzonej. Wyjątków jest bardzo mało, np. długość można mierzyć bez przetwarzania. W pomiarach bezpośrednich wydzielono kilka metod podstawowych: oceny bezpośredniej, różnicową, zerową i koincydencji. W procesie pomiaru w pomiarach pośrednich szeroko jest stosowane przetwarzanie wielkości mierzonej.

Metoda oceny bezpośredniej – to metoda pomiaru, w której wartość wielkości jest określana bezpośrednio przez odczyt z przyrządu pomiarowego. Szybkość procesu pomiaru metodą oceny bezpośredniej czyni go często niezastąpionym w stosowaniu praktycznym. Dokładność pomiaru jest ograniczona.

Metoda różnicowa – to metoda porównania oparta na ocenie sygnału pomiarowego, będącego różnicą sygnałów pomiarowych pochodzących od badanego obiektu i od miary⁴. Metoda ta umożliwia otrzymanie wyników z dużą dokładnością. Może być stosowana, jeżeli istnieje miara o wymaganej dokładności. Jest to o wiele łatwiejsze niż budowa dokładnego przyrządu pomiarowego do pomiarów metodą oceny bezpośredniej.

Metoda zerowa – metoda porównania oparta na wyrównaniu sygnałów pomiarowych pochodzących od obiektu i od miary. W metodzie zerowej różnica między wielkością mierzoną i wartością chronioną przez miarę jest sprowadzana do zera.

Metoda koincydencji – metoda porównania oparta na wytworzeniu różnicy sygnałów pomiarowych pochodzących od obiektu i od miary oraz ocenie tej różnicy ze względu na zgodność sygnałów. Metoda ta odwołuje się do idei budowy przyrządów ze skalami noniuszowymi przy odbiorze sygnałów czasowych, a także przy pomiarach z wykorzystaniem zjawisk zdudnień, interferencji, efektu stroboskopowego.

⁴ Pojęcie miary zdefiniowano w podrozdziale 1.3.

1.3. Środki pomiaru

Do opisu urządzeń używanych do pomiarów stosuje się wiele różnych terminów. Poniżej zdefiniowano wybrane terminy na podstawie „Międzynarodowego słownika podstawowych i ogólnych terminów metrologii”⁵. Klasyfikację środków pomiaru techniki pomiarowej, obejmującą bezpośrednio środki pomiaru i biorące udział w procesie pomiarowym urządzenia pomocnicze i przybory, przedstawiono w dalszej kolejności.

Miara materialna – urządzenie przeznaczone do odtwarzania lub dostarczania jednej lub wielu znanych wartości danej wielkości w sposób niezmienny podczas jego stosowania.

Przetwornik pomiarowy – urządzenie pomiarowe przetwarzające, zgodnie z określonym prawem, wielkość wejściową na wielkość wyjściową.

Łańcuch pomiarowy – ciąg elementów przyrządu pomiarowego lub układu pomiarowego, tworzący drogę sygnału pomiarowego od wejścia do wyjścia.

Układ pomiarowy – kompletny zbiór przyrządów pomiarowych i innych zastosowanych urządzeń przeznaczony do wykonywania określonych pomiarów.

Stanowisko pomiarowe – układ pomiarowy zainstalowany na stałe.

Urządzenie wskazujące – część przyrządu pomiarowego prezentująca wskazanie.

Urządzenie rejestrujące – część przyrządu pomiarowego rejestrująca wskazanie.

Czujnik – element przyrządu pomiarowego lub łańcucha pomiarowego, na który oddziałuje bezpośrednio wielkość mierzona.

1.4. Wyniki pomiarów i ich dokładność

Pomiar nie jest końcową częścią procesu działalności ludzkiej. Pomiar to proces, którego końcowym etapem jest wynik pomiaru, określający następne działania człowieka. Celem przeprowadzania pomiarów jest wskazanie zakresu wymagań stawianych wynikom pomiarów i ich jakości. Podstawowymi charakterystykami jakości wyniku pomiaru są dokładność i wiarygodność, a sposobem ich wyrażania jest niepewność pomiaru.

W 1995 roku uzgodniono międzynarodowe normy dotyczące „niepewności w pomiarach”, a Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna ISO opublikowała odpowiedni przewodnik⁶. Norma dotyczy odróżnienia niepewności pomiarowych od błędów, przyjęcia niepewności standardowej jako miary niepewności w pomiarach, ujednolicenia zapisu wyników, korzystania z metod statystycznych do oceny i obliczania niepewności itp. Niepewność pomiaru definiuje się jako parametr charakteryzujący rozrzut wartości wyników, które można w uzasadniony sposób przypisać wielkości mierzonej. Odchylenie standardowe obliczone dla serii pomiarów jest przykładowym parametrem określającym niepewność pomiarową. Na niepewność pomiarową mają wpływ następujące czynniki:

⁵ Międzynarodowy słownik..., op. cit.

⁶ Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik, Główny Urząd Miar, Warszawa 1999.

- naturalny rozrzut wielkości mierzonych,
- przyrząd i metoda pomiaru,
- nieprecyzyjne zdefiniowanie wielkości mierzonej,
- sposób wykonania pomiarów.

Całkowity wynik pomiaru składa się z wartości przypisanej wielkości mierzonej, uzyskanej drogą pomiaru, oraz z wartości przypisanej niepewności pomiarowej. Niepewność wyniku pomiarowego świadczy o braku informacji o dokładnej wartości wielkości mierzonej. Do podstawowych przyczyn niepewności w pomiarach należy zaliczyć:

- niekompletną definicję wielkości mierzonej,
- niedokładne odwzorowanie tej definicji w pomiarze,
- niereprezentatywność serii wyników pomiarowych,
- niedokładną znajomość wpływu czynników otoczenia,
- błędy obserwatora przy odczycie wyników,
- ograniczoną zdolność rozdzielczą przyrządów,
- niedokładne wartości stosowanych standardów i materiałów odniesienia,
- niedokładne wartości wielkości stałych lub pochodzących z innych źródeł,
- przybliżenia i założenia przyjęte w procedurze pomiarowej i w pomiarach,
- zmiany kolejnych wyników pomiarowych wielkości mierzonej.

Na podstawie przewodnika „Wyrażanie niepewności pomiaru” stosowane są następujące terminy o nowym znaczeniu:

Niepewność standardowa $u(x)$ jest to niepewność pomiarowa odpowiadająca odchyleniu standardowemu średniej.

Niepewność typu A (niepewność obliczona metodą typu A) jest oparta na metodzie określenia niepewności pomiarowej drogą analizy statystycznej serii wyników pomiarowych.

Niepewność typu B (niepewność oszacowana metodą typu B) jest oparta na metodzie określania niepewności pomiarowej drogą inną niż w przypadku A, np. zgodnie z wiedzą o wzorcowaniu przyrządów pomiarowych.

Niepewność standardowa złożona $u_c(x)$ jest niepewnością wyników pomiarów pośrednich i jest obliczana z prawa przenoszenia niepewności pomiarowych.

Niepewność rozszerzona $U(x)$ jest miarą pewnego „przedziału zaufania” otaczającego wynik pomiaru. Oczekujemy, że w przedziale tym jest zawarta duża ilość wartości, które w rozsądny sposób można przypisać wielkości mierzonej.

Współczynnik rozszerzenia k jest mnożnikiem niepewności standardowej stosowanym w celu uzyskania niepewności rozszerzonej. Typowe wartości tego współczynnika mieszczą się w przedziale między $k = 2$ a $k = 3$.

Wyróżnienie niepewności typu A i B wskazuje na dwie różne drogi oceny składników niepewności. Obydwa sposoby oceny oparte są na rozkładach prawdopodobieństwa, a ilościowymi miarami każdego z tych składników jest odchylenie standardowe. Niepewność standardową typu A oblicza się na podstawie rozkładu

częstotliwości. Niepewność standardową typu B szacuje się w oparciu o rozkład prawdopodobieństwa założony przez eksperymentatora.

Według aktualnych zaleceń terminologicznych błąd pomiaru występuje wtedy, gdy występuje jakaś niedoskonałość w pomiarze, która ma wpływ na uzyskany wynik końcowy. Tradycyjnie wyróżnia się dwa składniki błędu: *przypadkowy i systematyczny*. Błąd przypadkowy jest wynikiem nieprzewidywalnych czasowych lub przestrzennych zmian czynników wpływających na pomiar⁷. Zatem wchodzi on w skład pojęcia niepewności standardowej. Nie można go skompensować, a jego wartość oczekiwana wynosi zero.

Błąd systematyczny jest również wynikiem działania czynników wpływających na pomiar, a szczególnie ich czasowych lub przestrzennych zmian, ale te czynniki można rozpoznać, a jeżeli ich wpływ jest znaczący, to można i należy wprowadzić poprawkę kompensacyjną. Przy analizie niepewności pomiarowych zakłada się, że wynik jest wolny od błędu. Oznacza to, że do wyników pomiarowych wprowadzono poprawki kompensujące błąd. Słowo *błąd* odąd będzie stosowane tylko w znaczeniu tego, co dotąd nazywano błędem systematycznym.

Dokładność pomiarów w dużej mierze zależy od niepewności przyrządu pomiarowego. Sposobem określenia niepewności przyrządu jest kontrola okresowa, kalibracja i skalowanie przyrządów pomiarowych.

Kontrola. Działanie dokonywane przez organ służby metrologicznej, mające na celu określenie charakterystyk przyrządu pomiarowego i ustalenie jego przydatności do użycia na podstawie zgodności wyników kontroli z ustalonymi wymaganiami. Jeżeli kontrolowane przyrządy pomiarowe są przeznaczone do zastosowania z uwzględnieniem poprawek do ich wskazań, to podczas kontroli określone są ich niepewności. Jeżeli są one przeznaczone do zastosowania bez wprowadzania poprawek (np. w handlu), to podczas kontroli jest wyjaśniane czy niepewności nie przekraczają niepewności dopuszczalnych.

Kalibracja. Zbiór operacji ustalających, w określonych warunkach, relację między wartościami wielkości mierzonej wskazanymi przez przyrząd pomiarowy lub układ pomiarowy a odpowiednimi wartościami wielkości określonymi przez wzorce jednostki miary.

Skalowanie. Ustalenie położenia wskazów przyrządu pomiarowego w zależności od odpowiedniej wartości wielkości mierzonej.

Takie działania metrologiczne, jak kontrola, kalibracja, skalowanie, wymagają przyrządów pomiarowych o wysokiej dokładności, wyższej od przyrządów kontrolowanych czy skalowanych. Celom tym służą wzorce różnej dokładności.

Wzorzec jednostki miary. Wzorzec miary, przyrząd pomiarowy, materiał odniesienia lub układ pomiarowy, przeznaczony do zdefiniowania, zrealizowania, zachowania lub odtwarzania jednostki miary albo jednej lub wielu wartości pewnej wielkości i służący jako odniesienie.

Wzorzec międzynarodowy jednostki miary. Wzorzec jednostki miary uznany umową międzynarodową za podstawę do przypisywania wartości innym wzorcom jednostki miary danej wielkości.

⁷ *Teoria pomiarów*, red. H. Szydłowski, PWN, Warszawa 1981.

Wzorzec państwowy jednostki miary. Wzorzec jednostki miary uznany urzędowo w danym kraju za podstawę do przypisywania wartości innym wzorcom jednostki miary danej wielkości.

Wzorzec pierwotny jednostki miary. Wzorzec jednostki miary, który jest ustalony lub powszechnie uznany za charakteryzujący się najwyższą jakością metrologiczną i którego wartość jest przyjęta bez odniesienia do innych wzorców jednostki miary tej samej wielkości.

Wzorzec wtórny jednostki miary. Wzorzec jednostki miary, którego wartość jest utworzona przez porównanie z wzorcem podstawowym jednostki miary tej samej wielkości.

Wzorzec odniesienia jednostki miary. Wzorzec jednostki miary o najwyższej zazwyczaj jakości metrologicznej dostępny w danym miejscu lub danej organizacji, który stanowi odniesienie do wykonywanych tam pomiarów.

Wzorzec roboczy jednostki miary. Wzorzec jednostki miary używany zwykle do wzorcowania lub sprawdzania wzorców miar, przyrządów pomiarowych lub materiałów odniesienia.

W tabeli 1.1 podano terminy użyte w tym rozdziale w językach polskim, angielskim i rosyjskim.

Tabela 1.1

TERMINOLOGIA

Język polski	Język angielski	Język rosyjski
Błąd pomiaru	Error of measurement	Погрешность измерения
Błąd przypadkowy	Random error	Случайная погрешность
Błąd systematyczny	Systematic error	Систематическая погрешность
Dokładność pomiaru	Accuracy of measurement	Точность измерения
Jednostka wielkości fizycznej	Unit of a physical quantity	Единица физической величины
Justowanie	Adjustment	Юстировка
Kalibracja	Calibration	Калибровка
Metoda koincydencji	Coincedence method	Метод совпадений
Metoda pomiarowa	Method of measurements	Метод измерений
Metoda różnicowa	Differential method	Дифференциальный метод
Metoda zerowa	Zero method of measurements	Нулевой метод
Metrologia	Metrology	Метрология
Miara	Actual measure	Мера
Niepewność	Uncertainty	Неопределенность измерений
Niepewność rozszerzona	Expanded uncertainty	Расширенная неопределенность
Niepewność standardowa	Standard uncertainty	Стандартная неопределенность измерений
Niepewność standardowa złożona	Combined standard uncertainty	Суммарная стандартная неопределенность
Niepewność typu A	Type A evaluation of uncertainty	Неопределенность по типу А
Niepewność typu B	Type B evaluation of uncertainty	Неопределенность по типу В
Pomiar	Measurement	Измерение
Pomiar bezpośredni	Direct measurement	Прямое измерение
Pomiar pośredni	Indirect measurement	Косвенное измерение
Powtarzalność pomiarów	Reproducibility of measurements	Воспроизводимость измерений

Język polski	Język angielski	Język rosyjski
Przetwornik pomiarowy	Measuring transducer	Измерительный преобразователь
Przyrząd pomiarowy	Measuring apparatus	Измерительный прибор
Skalowanie	Graduation	Градировка
Układ pomiarowy	Measuring system	Измерительная система
Urządzenie pomiarowe	Measuring device	Измерительная установка
Wartość wielkości fizycznej	Value of a physical quantity	Значение физической величины
Wielkość fizyczna	Physical quantity	Физическая величина
Współczynnik rozszerzenia	Coverage factor	Коэффициент охвата
Wymiar wielkości fizycznej	Magnitude of a physical quantity	Размер физической величины
Wynik pomiaru	Result of measurement	Результат измерения
Wzorzec jednostki	Standard of an unity	Эталон единицы
Wzorzec pierwotny	Primary standard	Первичный эталон
Wzorzec wtórny	Secondary standard	Вторичный эталон
Zasada pomiaru	Principle of measurement	Принцип измерения

ODTWARZANIE SKALI JEDNOSTEK RADIOMETRYCZNYCH W TECHNICIE LASEROWEJ

2.1. Kalorymetr jako wzorzec jednostki mocy średniej i energii promieniowania laserowego

2.1.1. Układ odtwarzania jednostki mocy i energii promieniowania laserowego i przekazania ich wielkości w Stanach Zjednoczonych

Wzorcem jednostki mocy średniej i energii promieniowania laserowego w Stanach Zjednoczonych są specjalnie skonstruowane kalorymetry podstawienia elektrycznego, zwane też kalorymetrami kalibrowanymi elektrycznie⁸. Asortyment kalorymetrów tego typu pozwala na pokrycie dużego przedziału zmian wielkości jednostki energetycznej w szerokim zakresie spektralnym.

Każdy z kalorymetrów składa się z komory pochłaniającej, umieszczonej w termostacie. Zmiana różnicy temperatur między komorą a termostatem kontrolowana jest za pomocą termopar i mostka różnicowego typu oporowego. Przy przepuszczaniu prądu kalibracji przez uzwojenie zamiany, znajdujące się wokół komory pochłaniającej, wyznacza się elektryczny współczynnik kalibrujący. Podczas oddziaływania promieniowania laserowego z komorą pochłaniającą jest ona ogrzewana. Powstające w ten sposób napięcie z termopar porównuje się z elektrycznym współczynnikiem kalibrującym, w rezultacie czego ustala się wielkość mocy (energii) promieniowania lasera. Dlatego podstawowym wymaganiem przy konstruowaniu kalorymetru jest równoważność odwzorowania mocy promieniowania laserowego i elektrycznej mocy zamiany.

W USA wykorzystuje się w charakterze źródeł trzy typy kalorymetrów: C, Q i K.

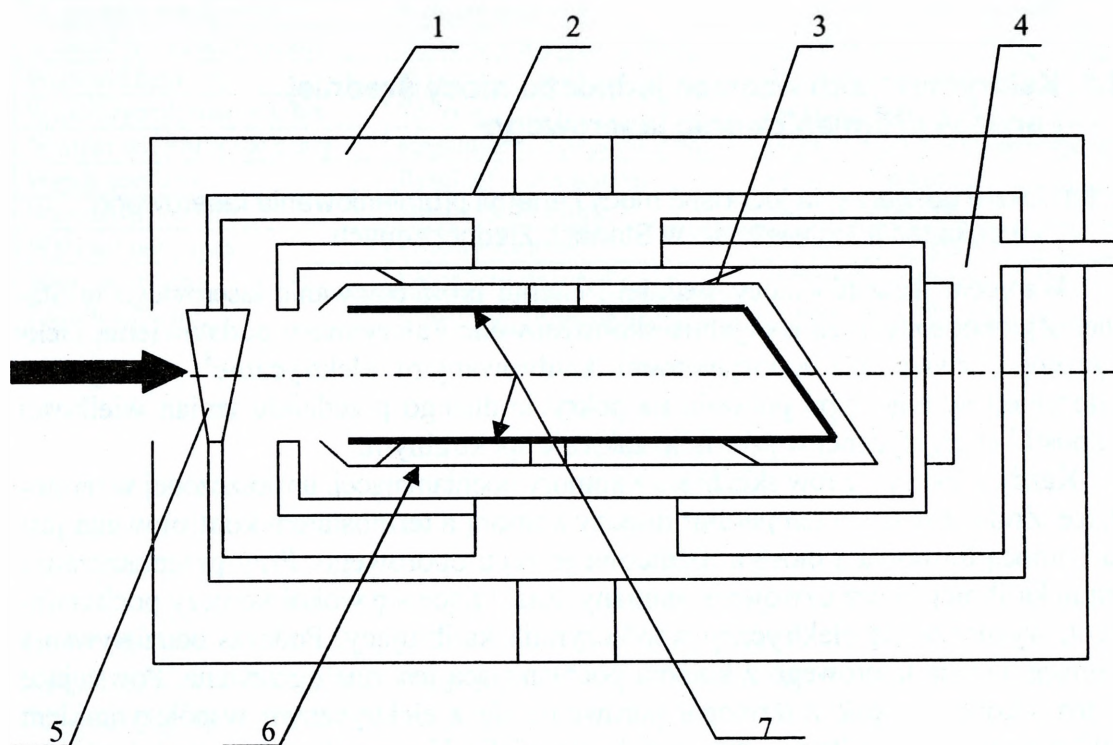
Kalorymetr typu C

Kalorymetr typu C (rysunek 2.1) przeznaczony jest do pomiaru mocy ciągłego promieniowania laserowego w zakresie zmian dynamicznych od 1 mW do 2 W. Komora pochłaniająca kalorymetru typu C ma postać cienkościennego miedzianego cylindra, którego powierzchnia wewnętrzna pokryta jest czarną farbą. Ciepło, wytwarzane pod wpływem promieniowania laserowego, przepływa przez komorę pochłaniającą, a następnie przez ekran wychwytyjący. Ekran wychwytyjący połączony jest z komorą pochłaniającą za pośrednictwem termostatu, którego temperatura kontrolowana jest z dokładnością do $\pm 0,1$ mK. Kalorymetr utrzymuje próżnię do ciśnienia około 10^{-6} Pa, co znacząco obniża konwekcyjne straty ciepła. Wewnętrzna powierzchnia kalorymetru, z wyłączeniem powierzchni pochłaniających,

⁸ T.R. Scott, *NBS Laser power and energy measurements*, SPIE 1988, Vol. 888, Laser Beam Radiometry.

pokryta jest złotem, co pozwala na zmniejszenie strat związanych z wymianą ciepła między wewnętrznymi powierzchniami kalorymetru.

Okno wejściowe wykonane ze szkła kwarcowego umożliwia pracę kalorymetru typu C w zakresie widma 0,4–2 μm .



Rys. 2.1. Kalorymetr typu C

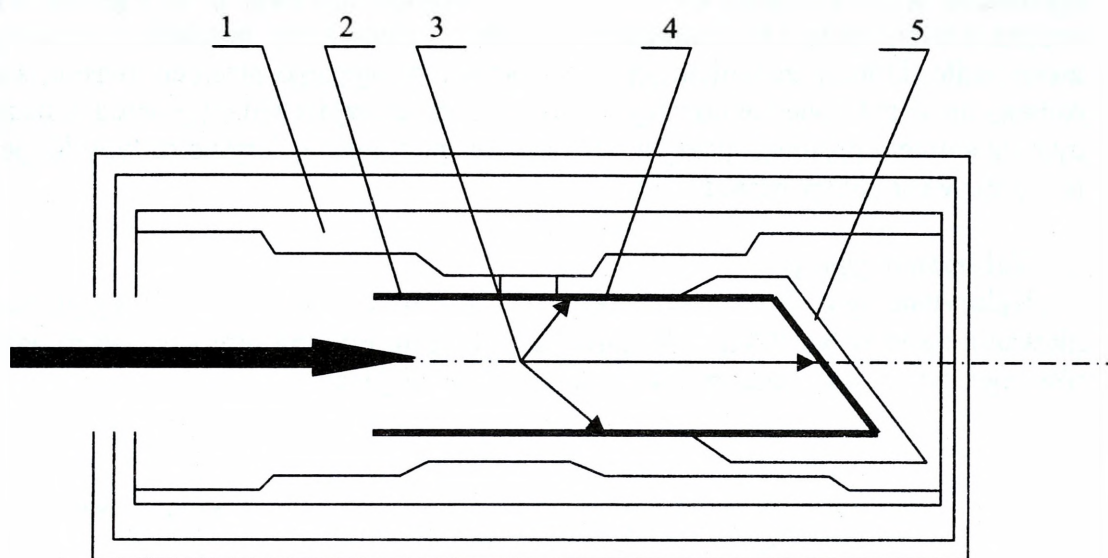
- 1 – termostat z kontrolą temperatury; 2 – system kontroli temperatury; 3 – termopary;
4 – komora próżniowa; 5 – okno wejściowe; 6 – połączone pokrycie odbijające;
7 – pokrycie pochłaniające komory.

Kalorymetr typu K2

Kalorymetr typu K2 (rysunek 2.2) przeznaczony jest do pomiaru mocy ciągłego promieniowania laserowego w zakresie zmian dynamicznych od 0,2 mW do 40 W. Komorę pochłaniającą kalorymetru typu K2, podobnie jak kalorymetru typu C, stanowi cienkościenny miedziany cylinder, którego powierzchnia wewnętrzna pokryta jest czarną farbą. Brak okna wejściowego kalorymetru umożliwia jego pracę w zakresie widma 0,4–22 μm .

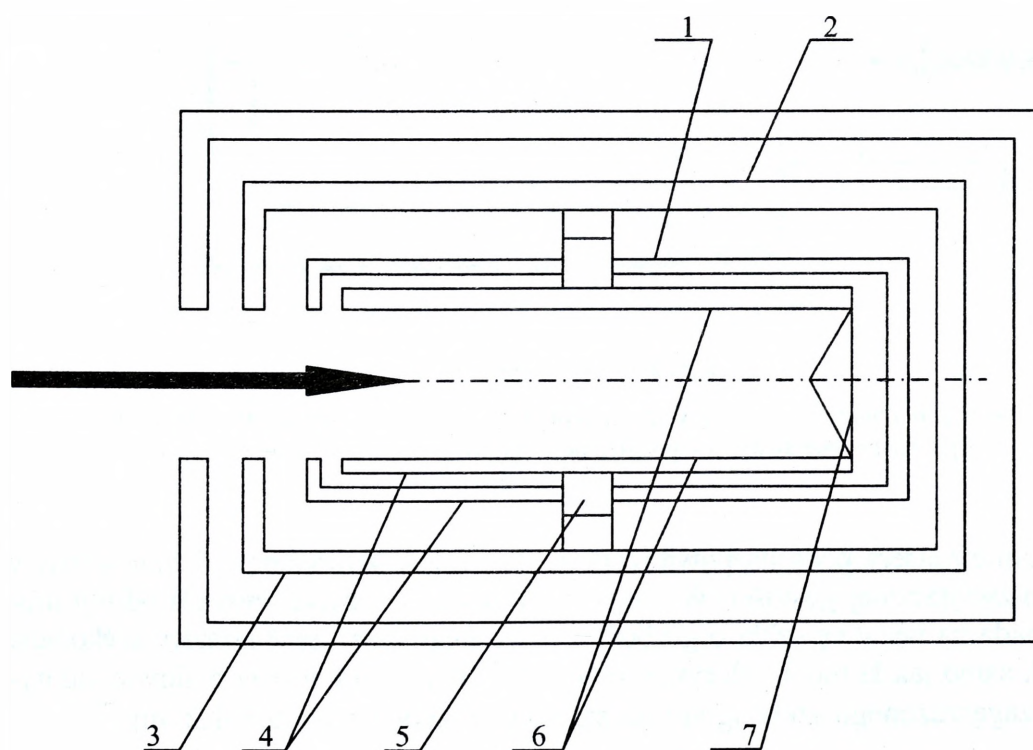
Kalorymetr typu K1

Kalorymetr typu K1 (rysunek 2.3) przeznaczony jest do pomiaru mocy ciągłego promieniowania laserowego w zakresie zmian dynamicznych od 5 do 1000 W. Komorę pochłaniającą kalorymetru typu K1, podobnie jak kalorymetru typu K2,



Rys. 2.2. Kalorymetr typu K2

1 – termostat z kontrolą temperatury; 2 – połączone pokrycie odbijające; 3 – pokrycie pochłaniające komory; 4 – mostek termoczuły; 5 – uzwojenie zamiany.



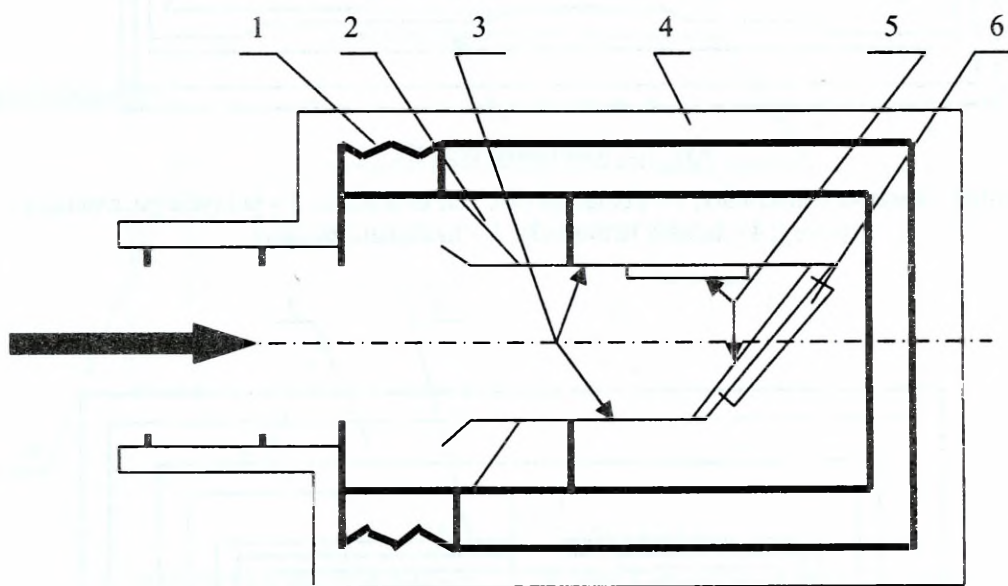
Rys. 2.3. Kalorymetr typu K1

1 – mostek termoczuły; 2 – mostek kontroli temperatury; 3 – termostat z kontrolą temperatury; 4 – połączone pokrycie odbijające; 5 – uzwojenie zamiany; 6 – pokrycie pochłaniające komory; 7 – połączone zwierciadło stożkowe.

wykonano w postaci cienkościennego miedzianego cylindra, pokrytego od wewnątrz czarną farbą. W podstawie cylindra umieszczono poślizgane stożkowe zwierciadło, którego zadaniem jest rozpraszanie padającego promieniowania laserowego na ścianki boczne komory, a tym samym zabezpieczenie jej przed niszczącym działaniem promieni dużej mocy. Zakres spektralny kalorymetru typu K1 jest identyczny jak kalorymetru typu K2.

Kalorymetr typu Q

Kalorymetr typu Q (rysunek 2.4) przeznaczony jest do pomiaru mocy promieniowania laserów Nd:YAG o długości fali $1,06 \mu\text{m}$. Energia promieniowania laserów tego typu rozpraszana jest w komorze pochłaniającej.



Rys. 2.4. Kalorymetr typu Q

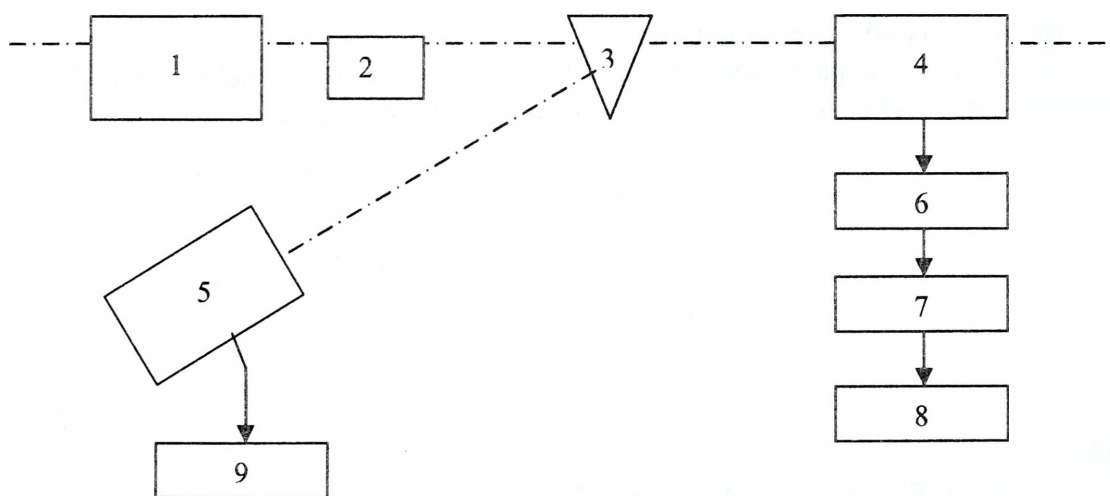
- 1 – system kontroli temperatury; 2 – termopary; 3 – pokrycie pochłaniające komory;
4 – polirueta piankowy; 5 – pochłaniacz objętościowy; 6 – uzwojenie zamiany.

Promień lasera pada na powierzchnię odbijającą, wykonaną z 2 mm warstwy szkła o zwiększonej gęstości. W miejscu pierwszego odbicia Fresnela odbity promień pada na warstwę szkła o grubości 1 mm. Pozostała część komory wykonana jest tak samo jak komora kalorymetru typu K1. Wykorzystanie w budowie kalorymetru zagęszczonego szkła ogranicza zakres widma do pasma $0,5\text{--}1,2 \mu\text{m}$.

Procedura kalibracji urządzeń pomiarowych mocy średniej (energii) promieniowania laserowego

Kalibrację przyrządów pomiarowych mocy średniej (energii) promieniowania laserowego wykonuje się na stanowisku, którego schemat funkcjonalny przedstawiono

na rysunku 2.5 (według przepisów National Institute Standards and Technology w USA stanowisko to nie wchodzi w skład zestawu wzorca). Promień lasera (1), przechodząc przez osłabiacz (3), pada na kalorymetr pierwotny (4) – jeden z wymienionych typów. Promień odbity od osłabiacza pada na kalibrowaną głowicę pomiarową (5) przyrządu pomiarowego (9). Osłabiacz jest kalibrowany według wartości współczynnika podziału dla długości fali promieniowania lasera. Na podstawie wartości współczynnika podziału osłabiacza, uzyskanego przy wykorzystaniu do tego mocy średniej mierzonej za pomocą kalorymetru (4) oraz wskazań przyrządu pomiarowego (9), określa się wynik procedury przekazania wielkości jednostki (współczynnik ekwiwalentności, współczynnik przetwarzania itp.) mocy średniej (energii) promieniowania laserowego i tę wartość przypisuje się kalibrowanej głowicy pomiarowej, która to wartość stanowi jej charakterystykę metrologiczną.



Rys. 2.5. Stanowisko do przekazania przyrządom pomiarowym wielkości jednostki mocy (energii) promieniowania laserowego

1 – laser; 2 – migawka; 3 – osłabiacz; 4 – kalorymetr; 5 – kalibrowana głowica pomiarowa;
6 – wzmacniacz; 7 – interfejs; 8 – komputer; 9 – przyrząd pomiarowy.

Błąd pomiaru mocy średniej (energii) promieniowania laserowego

Ocena sumarycznego błędu pomiaru mocy średniej (energii) promieniowania laserowego określona jest zależnością:

$$\left[U = 3 \Sigma \sigma_s^2 + \Sigma \left(\frac{S_r^2}{N} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

gdzie:

- $\Sigma \sigma_s$ – suma błędów systematycznych, powstających w czasie pomiarów,
- ΣS_r – suma błędów przypadkowych pomiarów,
- N – liczba pomiarów w serii.

Błędy systematyczne pomiarów

Wszystkie błędy systematyczne pomiarów są niezależne i mają jednakowy rozkład (każdy z nich ma jednakową wartość prawdopodobieństwa w przedziale $\pm \delta$ i zerową wartość prawdopodobieństwa poza tym przedziałem). Dla prostokątnego rozkładu odchylenia standardowego σ_s , dla każdego systematycznego wartość błędów jest równa :

$$\left(\frac{\delta_i}{3} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

a ogólne odchylenie w przybliżeniu jest równe $(\sum \sigma_s^2)^{\frac{1}{2}}$, czyli następuje sumowanie geometryczne wszystkich błędów systematycznych.

Błędy przypadkowe pomiarów

Dla błędów przypadkowych pomiarów przyjęto rozkład normalny. Odchylenie uzyskiwane w trakcie każdego pomiaru określone jest zależnością:

$$S_r = \left[\frac{\left(\begin{array}{cc} \Sigma x^2 & \Sigma x^2 \\ & N \end{array} \right)}{N - 1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

gdzie:

x – odczyt przy każdym pomiarze w serii,

N – liczba pomiarów w serii.

Wartość średnią pomiaru w serii określa wzór $\frac{S_r}{\sqrt{N}}$, a odchylenie standardowe oblicza się z zależności:

$$\left(\frac{\Sigma S_r^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Błędy przypadkowe, ich wartości średnie i odchylenia standardowe wszystkich typów kalorymetrów przedstawiono w tabeli 2.1.

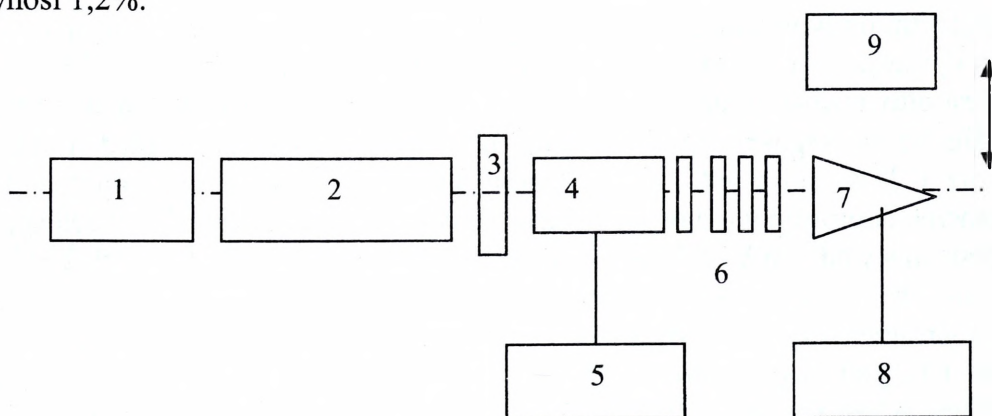
Tabela 2.1
WIELKOŚĆ BŁĘDÓW POMIAROWYCH DLA POSZCZEGÓLNYCH TYPÓW KALORYMETRÓW

Błędy pomiarowe	Kalorymetr typu C	Kalorymetr typu Q	Kalorymetr typu K1	Kalorymetr typu K2
Nieekwiwalentność %	0,15	0,48	0,25	0,56
Współczynnik pochłaniania %	0,01	0,02	0,59	0,21
Uzwojenie zamiany %	0,01	0,10	0,34	0,34
Elektronika %	0,02	0,02	0,02	0,02
Transmisja okna %	0,12	–	–	–
Błędy pomiarowe %	0,02	0,04	0,03	0,06
Liczba pomiarów w serii	27	32	60	100
Błąd sumaryczny %	0,34	0,85	1,26	1,19

2.1.2. Systemy odtwarzania jednostek energetycznych promieniowania laserowego i przekazania ich wielkości w Chinach

Analogiczne systemy wykonania wzorca jednostek energetycznych promieniowania laserowego wykorzystywane są w Chinach⁹. Podstawowa różnica wynika ze schematu zestawu pomiarowego do przekazania wielkości jednostki mocy średniej (energii) promieniowania laserowego. Jak widać na rysunku 2.6, proces przekazania wielkości jednostki energii impulsowego promieniowania laserowego polega najpierw na pomiarze jego mocy za pomocą wzorcowego kalorymetru (7), a następnie na zainstalowaniu na jego miejsce kalibrowanego przyrządu pomiarowego (9) i powtórzenia procedury pomiarowej wartości energii tym przyrządem pomiarowym. Rezultat przekazania wielkości jednostki energii impulsowego promieniowania laserowego określa się, porównując sygnał wyjściowy kalibrowanego przyrządu pomiarowego z wartością energii zmierzonej za pomocą kalorymetru wzorcowego.

Sumaryczny błąd pomiaru energii impulsowego promieniowania laserowego wynosi 1,2%.



Rys. 2.6. Schemat układu przekazania wielkości jednostki energii impulsowego promieniowania laserowego stosowanego w Chinach

1 – laser He-Ne; 2 – laser impulsowy YAG; 3 – filtr; 4, 5 – odbiornik kontrolny; 6 – osłabiacze; 7 – kalorymetr wzorcowy; 8 – woltomierz cyfrowy; 9 – kalibrowany przyrząd pomiarowy.

⁹ Xu Dagang, Mao Sihua, *Metrological Guarantee for Laser Safety International Symposium on the Safe Application of Laser Beams*, ISSA – Section Electricity, Beijing, 10–14 May 1988, s. 21–23.

2.2. Kriogeniczny radiometr absolutny jako wzorzec jednostek mocy średniej i energii promieniowania laserowego

2.2.1. Charakterystyka kriogenicznych radiometrów absolutnych

W ciągu ostatniego dziesięciolecia w celu minimalizacji błędów odtwarzania energetycznych jednostek promieniowania laserowego wiele państw podejmuje próby wykorzystania w charakterze pierwotnego wzorca jednostek mocy średniej i energii promieniowania laserowego absolutny radiometr kriogeniczny.

Podstawowymi zaletami absolutnego radiometru kriogenicznego są:

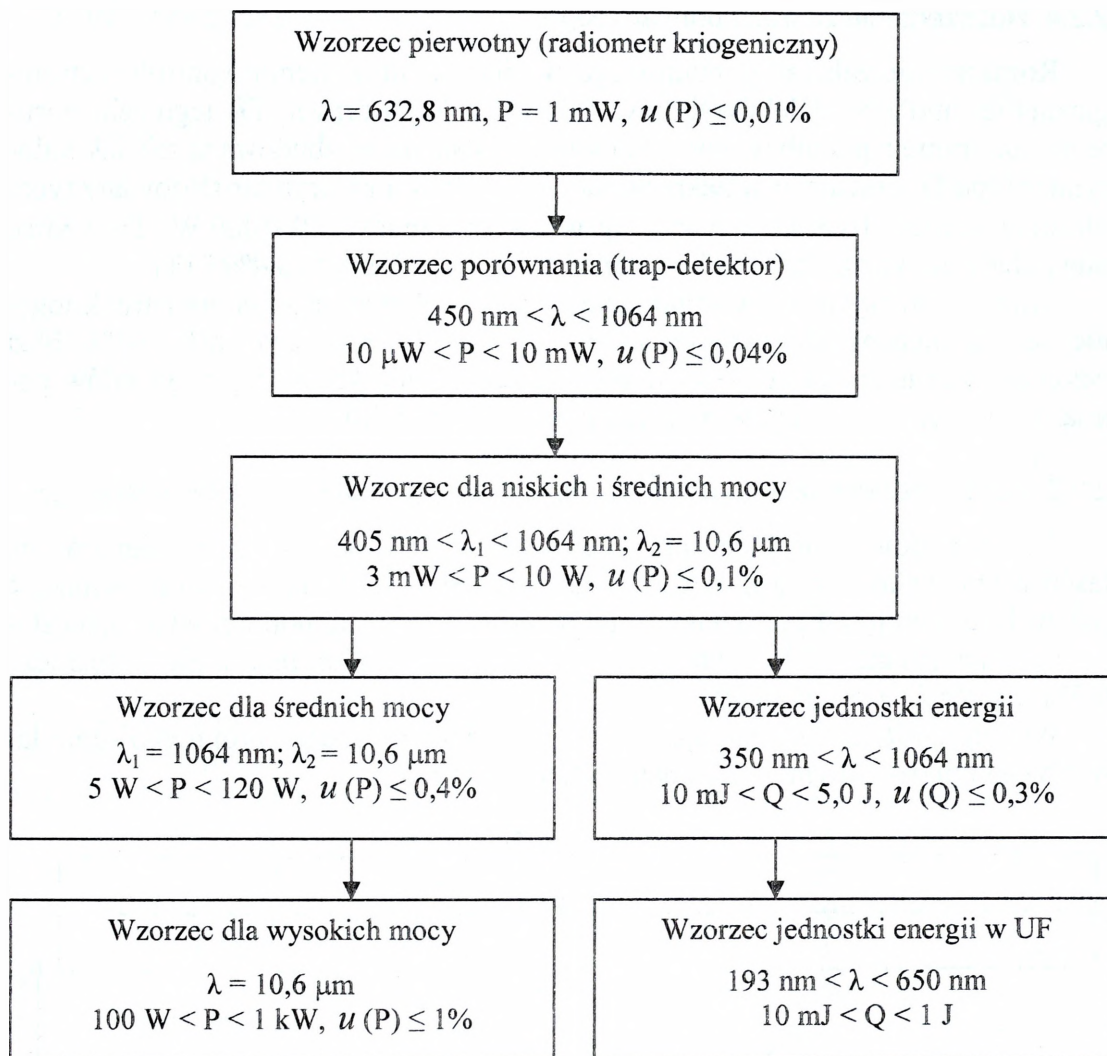
- znaczne zmniejszanie pojemności cieplnej czystych metali przy bardzo niskich temperaturach (kriogenicznych), co pozwala na uzyskanie dużego (prawie idealnego) pochłaniania promieniowania optycznego bez istotnego powiększenia stałej czasowej przetwornika pomiarowego;
- zmniejszenie błędów wynikających z nieekwiwalentności zamiany mierzonej mocy optycznej na znaną moc elektryczną; podstawą zmniejszenia błędów jest zwiększenie przewodnictwa cieplnego;
- możliwość pominięcia strat cieplnych, powstających w nadprzewodnikach.

Te zalety absolutnego radiometru kriogenicznego pozwalają obecnie tworzyć na jego bazie wzorce jednostek energetycznych promieniowania laserowego z minimalnym błędem odtwarzania jednostek mocy średniej i energii promieniowania laserowego. Zasadę budowy wzorca radiometrycznego prześledzimy na przykładzie niemieckiego wzorca państwowego znajdującego się w Physikalische-Technische Bundesanstalt w Brunzshwiku.

2.2.2. System odtwarzania jednostek mocy i energii promieniowania laserowego i pomiaru ich parametrów w Niemczech

Algorytm odtworzenia jednostki mocy średniej i energii promieniowania laserowego i przekazania wielkości jednostek przedstawiono na rysunku 2.7. Jednostka mocy jest odtwarzana na bazie absolutnego radiometru kriogenicznego za pomocą lasera He-Ne na długości fali $0,6328 \mu\text{m}$ i poziomie mocy 1 mW , z błędem mniejszym niż $0,01\%$. Jej wielkość przekazuje się z wykorzystaniem trap-detektora pierwotnemu laserowemu radiometrowi dla małych i średnich poziomów, pracującemu w zakresie mocy od 3 mW do 10 mW , i dalej zgodnie z algorytmem (rysunek 2.7)¹⁰.

¹⁰ Y. Metzdorf, *Network and Traceability of the Radiometric and Photometric Standard at the PTB*, Metrologia 1993, Vol. 30, s. 403–408; R.D. Stock, H. Hoter, *Present State of the PTB Primary Standard for Radiant Power Based on Cryogenic Radiometry*, Metrologia 1993, Vol. 30, s. 291–296.



Rys. 2.7. Algorytm odtworzenia jednostki mocy średniej i energii promieniowania laserowego oraz przekazania ich wielkości stosowany w Niemczech

2.2.3. Pierwotny radiometr laserowy małych i średnich poziomów

Pierwotny radiometr laserowy małych i średnich poziomów jest zbudowany podobnie jak kalorymetr typu C (USA). Różnią się jedynie elementem odbiorczym (pochłaniaczem), który w pierwotnym radiometrze laserowym małych i średnich mocy wykonany jest w postaci komory stożkowej. Pochłaniacz jest polerowanym stożkiem z naniesioną na powierzchnię wewnętrzną warstwą niklu, pozwalającą na prawie lustrzane odbicie. Grubość powłoki wynosi około 1 μm . Ochronia ona element odbiorczy przed uszkodzeniami, które mogą powstać w rezultacie oddziaływania promieniowania laserowego ze zbyt dużą gęstością mocy.

2.2.4. Rozszerzenie zakresu pomiarowego

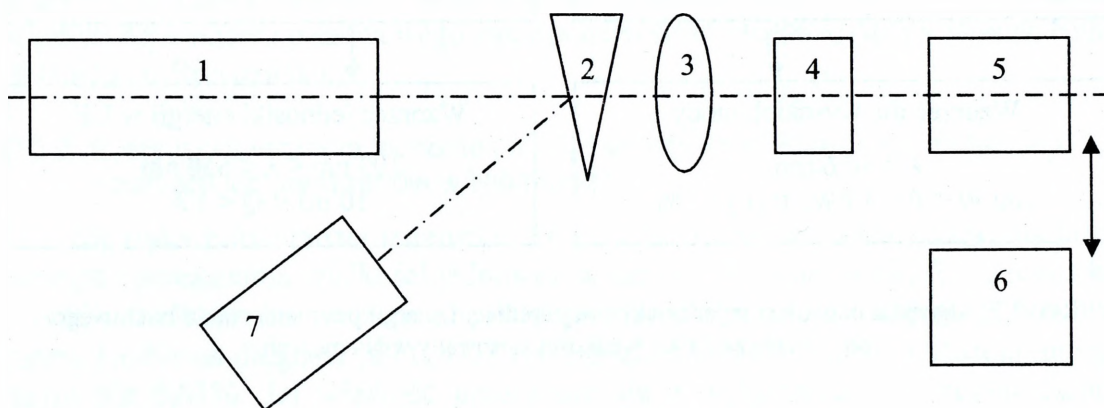
Rozszerzenie zakresu pomiarowego w niemieckim systemie kontroli metrologicznej jest możliwe dzięki wykorzystaniu wzorców wtórnych. Do tego celu stosuje się kalorymetr przepływowy z komorą pochłaniającą, zbudowaną tak jak kalorymetr typu Q, pracujący w zakresie mocy 5–120 W i kalorymetr stosowany tylko dla długości fali 10,6 μm i pracujący w zakresie mocy 100–1000 W. Te wzorce mają błędy odtwarzania wartości średniej mocy odpowiednio 0,4% i 1%.

Mimo wykorzystania w charakterze wzorca pierwotnego radiometru kriogenicznego z błędem odtworzenia wielkości jednostki mniejszym niż 0,01%, błąd wzorców wtórnych, które bezpośrednio zabezpieczają kalibrację przyrządów pomiarowych mocy średniej, w praktyce jest taki jak w USA.

2.2.5. Zabezpieczenie powtarzalności pomiarów energii promieniowania laserowego

Jako wzorcowy kalorymetr przy odtwarzaniu jednostki energii promieniowania laserowego wykorzystywany jest szklany kalorymetr dyskowy, który wielkość jednostki uzyskuje od pierwotnego radiometru w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 2.8. Sumaryczny błąd takiego kalorymetru nie przekracza 0,3% w zakresie energii 10–5000 mJ.

Według takiej zasady buduje się wzorce jednostek energii promieniowania laserowego między innymi we Francji i Wielkiej Brytanii¹¹.



Rys. 2.8. Schemat kalibracji przyrządów pomiarowych mocy średniej i energii promieniowania laserowego

1 – źródło promieniowania laserowego; 2 – osłabiacz; 3 – układ optyczny; 4 – migawka elektroniczna; 5 – kalorymetr wzorcowy; 6 – kalibrowany przyrząd pomiarowy; 7 – detektor odniesienia.

¹¹ T.J. Quinn, J.E. Martin, *A radiometric determination of the Stefan-Boltzmann constant and thermodynamic temperatures between -408 °C and +1008 °C*, Philos. Trans. R. Soc., London 1985, A 316, s. 85–189.

2.3. Wzorzec jako zestaw pomiarowy

2.3.1. Zabezpieczenie powtarzalności pomiarów promieniowania laserowego mocy średniej i energii w Rosji

W Rosji i krajach dawnego ZSRR (Ukraina i Białoruś) oraz w niektórych państwach Europy Wschodniej (Polska, Bułgaria) wzorce jednostek mocy średniej i energii zbudowane są w postaci zestawu pomiarowego, w skład którego wchodzi nie tylko przetwornik pomiarowy (kalorymetr, absolutny radiometr itd.), lecz również elementy pomiaru i rejestracji jego parametrów wyjściowych, źródła promieniowania laserowego, źródła kalibracji elektrycznej, i układ sterowania pracą wzorca. Takie podejście do budowy wzorca pozwala na utrzymanie stałości jego parametrów i charakterystyk metrologicznych przez cały okres jego eksploatacji.

Problem stworzenia systemu kontroli metrologicznej przyrządów pomiarowych mocy i energii promieniowania laserowego w Związku Radzieckim pojawił się w drugiej połowie lat siedemdziesiątych XX wieku. Najpilniejszym zadaniem było opracowanie państwowych wzorców jednostek tych wielkości i odpowiednich schematów kontroli, regulowanych procedurami przekazania wielkości jednostek za pomocą wzorców roboczych przyrządom pomiarowym. Obecnie w Rosji kontrolę metrologiczną przyrządów pomiarowych promieniowania laserowego mocy średniej i energii regulują procedury, ujęte w systemie kontroli GOST¹². Ta wielostopniowa struktura umożliwia kalibrację i sprawdzenie parametrów większości przyrządów pomiarowych mocy średniej i energii promieniowania laserowego.

Głównym elementem systemu kontroli GOST jest wzorzec pierwotny jednostki mocy średniej promieniowania laserowego, który odtwarza, przechowuje i przekazuje wielkość jednostki wzorcom wtórnym. Znajdują się one w ośrodkach rejonowych na terenie całego kraju i zapewniają ochronę oraz przekazanie wielkości jednostek mocy średniej i energii wzorcom roboczym. Mogą one być użyte do kalibrowania i pomiaru parametrów przyrządów znajdujących się u użytkownika. Budowa wzorców każdego ogniwa struktury systemu jest identyczna. Wszystkie wzorce systemu składają się ze źródła promieniowania laserowego, pierwotnego przetwornika pomiarowego, układu optycznego, urządzeń pomiaru i rejestracji sygnałów wyjściowych wzorca oraz układu sterowania.

2.3.2. Wzorzec pierwotny jednostki mocy średniej promieniowania laserowego (WPMŚ)

Odtwarzanie jednostki mocy średniej promieniowania laserowego oparte jest na pomiarze parametrów mocy promieniowania za pomocą specjalnie opracowanego wzorcowego pierwotnego przetwornika pomiarowego (WPPP) opartego na kalorymetrze, kalibrowanym metodą zamiany mocy promieniowania optycznego na moc elektryczną. Schemat strukturalny wzorca pierwotnego jednostki mocy

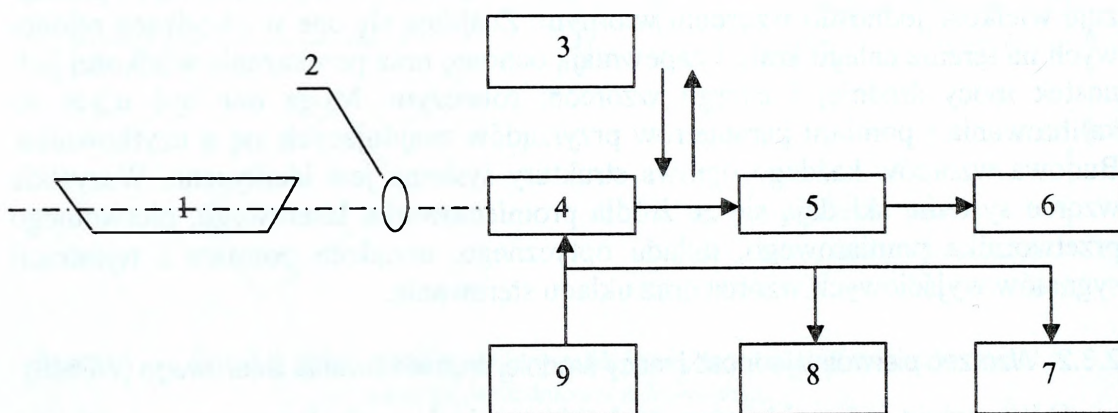
¹² Ustawa GOST 8.275-91 GSI. *Państwowy pierwotny wzorzec i schemat środków przenoszenia średniej mocy i energii promieniowania laserowego. Kriogeniczny radiometr absolutny pomiaru średniej mocy i energii promieniowania laserowego w skali długości fal 0,3–12 μm*, Standardy Krajowe Rosji, 1991, poz. 5c.

średniej promieniowania laserowego (WPMŚ) przedstawiono na rysunku 2.9. Promień lasera (1) ogniskowany jest przez układ optyczny (2), a następnie podawany do WPPP (4), kalibrowanego metodą zamiany mocy optycznej na moc elektryczną za pomocą wysoko stabilnego źródła kalibracji elektrycznej. Wyjściowy sygnał WPPP mierzy się przyrządem (5) (klasa dokładności 0,001). W celu określenia mocy prądu stałego, podawanej na uzwojenie grzejnika elektrycznego WPPP, przeprowadza się pomiar natężenia prądu (miernikiem 7 o klasie dokładności 0,002) i napięcia na cewce grzejnika (przyrządem 8 o klasie dokładności 0,001). Wszystkie parametry wyjściowe rejestrowane są w systemie sterowania (6).

Podczas przeprowadzania procedury przekazania jednostki mocy średniej promieniowania laserowego na miejsce WPPP wstawia się kalibrowany przyrząd pomiarowy.

W skład WPMŚ wchodzi także układ próżniowy, który zapewnia ekwiwalentność strat cieplnych z powierzchni elementu odbiorczego WPPP przy oddziaływaniu optycznym i elektrycznym, oraz system kontroli współczynnika przetwarzania, za pomocą którego określa się wielkość współczynnika ekwiwalentności kalibrowanego przyrządu pomiarowego na długości fali $10,6 \mu\text{m}$ i okresowo (pośrednio) kontroluje się stabilność charakterystyk metrologicznych WPPP.

Wyniki atestacji metrologicznej WPMŚ określa sumaryczny błąd odtwarzania i ochrony jednostki mocy średniej promieniowania laserowego na poziomie 0,1% w zakresie 0,08–0,8 W na długości fali $0,5 \mu\text{m}$, przy tym błąd systematyczny (BS) równy jest 0,04%, a średnie odchylenie kwadratowe (ŚOK) 0,03%. Błąd przekazania wielkości jednostki mocy średniej, wyrażony w postaci ŚOK, równy jest 0,1%.



Rys. 2.9. Schemat strukturalny WPMŚ

- 1 – źródło promieniowania laserowego; 2 – układ optyczny; 3 – kontrolowany przyrząd pomiarowy;
 4 – WPPP; 5 – przyrząd pomiaru sygnału wyjściowego; 6 – układ sterowania wzorcem; 7 – przyrząd pomiaru napięcia kalibracji elektrycznej; 8 – przyrząd pomiaru natężenia prądu kalibracji elektrycznej;
 9 – system kalibracji elektrycznej.

Taka budowa wzorca ma więcej zalet w porównaniu z koncepcją wzorców wykorzystywanych w USA, Niemczech, Anglii i innych krajach, dlatego że w skład wzorca wchodzi nie tylko kalorymetr, lecz również układy, które zabezpieczają jego funkcjonowanie i pozwalają na ograniczenie błędów składowych poszczególnych elementów mających wpływ na błąd sumaryczny wzorca.

Ponadto takie podejście nie wymaga budowania specjalnych stanowisk ani do badania i weryfikacji parametrów technicznych i charakterystyk metrologicznych przetworników pomiarowych, które wykorzystywane są w charakterze wzorców, ani do przeprowadzania kalibracji przyrządów pomiarowych.

Na podstawie analizy zasad budowania wzorców i systemów, przeznaczonych do odtwarzania jednostek mocy średniej i energii promieniowania laserowego oraz przekazania ich wielkości, systemy te można umownie podzielić na kilka podsystemów. Schemat strukturalny takiego systemu przedstawiono na rysunku 2.10. Jak widać na rysunku, błąd odtwarzania jednostki mocy średniej (energii) promieniowania laserowego określa algorytm odtwarzania tej jednostki, który z kolei zdeteminowany jest elementami składowymi wzorca. Podstawowymi podsystemami są:

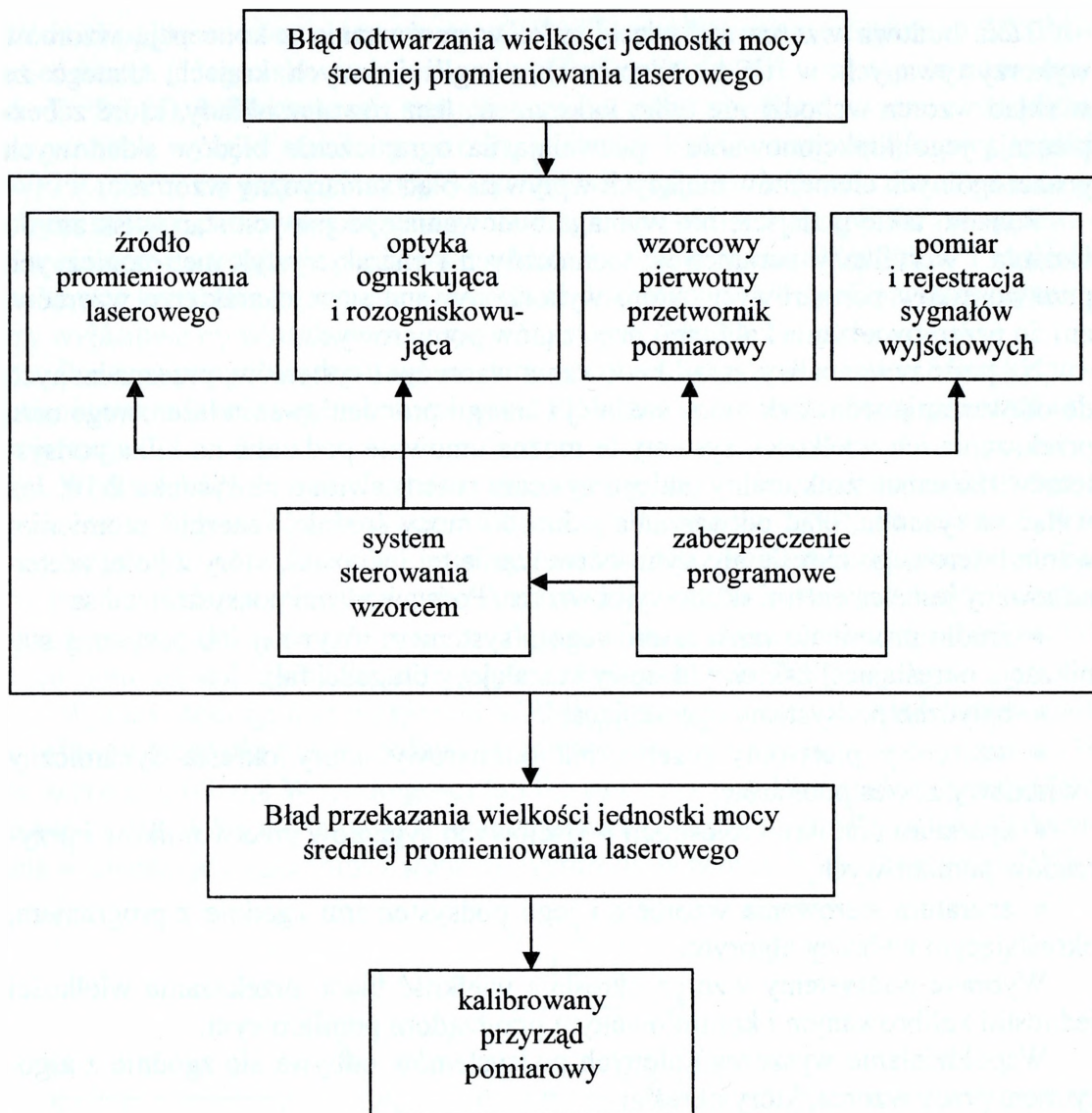
- źródło promieniowania laserowego z systemem aktywnej lub pasywnej stabilizacji, określającej zakres widmowy i ustalający długości fal;
- optyczne podsystemy ogniskujące;
- wzorcowy pierwotny przetwornik pomiarowy, który określa dynamiczny i widmowy zakres pomiarów;
- aparatura pomiaru i rejestracji wyjściowych sygnałów przetworników i przyrządów pomiarowych;
- aparatura sterowania wzorcem i jego podsystemami zgodnie z programem, określającym wybrany algorytm.

Wybrane podsystemy wzorca określają wielkość błędu przekazania wielkości jednostki kalibrowanym i kontrolowanym przyrządom pomiarowym.

Współdziałanie wyszczególnionych podsystemów odbywa się zgodnie z algorytmem pracy wzorca, który określa:

- minimalną liczbę podsystemów, którzy trzeba włączyć w skład systemu, aby poziom błędu nie przekraczał ustalonej wartości;
- sposób współdziałania tych podsystemów w procesie odtwarzania, ochrony i przekazywania wielkości jednostki;
- kolejność działań przy obróbce danych, określających ostateczny wynik.

Do kalibracji i kontroli przyrządów pomiarowych mocy średniej promieniowania laserowego we wszystkich krajach wykonano wzorce wielkości tej jednostki fizycznej, które funkcjonują jako samodzielne systemy informacyjno-pomiarowe (USA, Chiny i inne) lub wchodzi jako podporządkowane ogniwa w system kontroli metrologicznej (Rosja, Niemcy i inne), zapewniając spójność pomiarową mocy średniej promieniowania laserowego.



Rys. 2.10. Schemat strukturalny systemu

SYSTEM ZABEZPIECZENIA METROLOGICZNEGO TECHNIKI LASEROWEJ

3.1. Łańcuch porównań w metrologii promieniowania laserowego

System zabezpieczenia metrologicznego, powstały w wyniku rozwoju techniki pomiarowej towarzyszącemu tworzeniu nowych kierunków naukowych i technicznych, pozwala otrzymać gwarantowaną informację ilościową o procesie wytwarzania i eksploatacji towarów, wyrobów, materiałów, sprzętu technicznego itp. Tworząc podstawy systemu zabezpieczenia metrologicznego techniki laserowej w Polsce, szczególną uwagę należało zwrócić na:

- kierunki rozwoju techniki laserowej i optoelektroniki w różnych gałęziach gospodarki narodowej i dziedzinach bezpieczeństwa państwa;
- zakresy mierzonych parametrów źródeł promieniowania laserowego;
- konkretne rozwiązania techniczne, pozwalające na stworzenie minimalnej bazy metrologicznej, bez której niemożliwe jest zbudowanie systemu zabezpieczenia metrologicznego;
- uaktualnianie parametrów wzorców krajowych w ośrodkach zagranicznych.

Aby przyrząd pomiarowy, taki jak np. przetwornik pomiarowy, komparator, umożliwił uzyskanie użytecznej, gwarantowanej informacji ilościowej, musi być metrologicznie atestowany. Stąd *tworzenie państwowego systemu zabezpieczenia metrologicznego techniki laserowej* należało rozpocząć od koniecznego minimum.

W początkach lat siedemdziesiątych XX wieku pojawiły się pierwsze materiały źródłowe o zastosowaniach laserów w procesach technologicznych: spawania, cięcia, obróbki powierzchni, w układach kontrolowanej reakcji termojądrowej, inicjowania kontrolowanych reakcji chemicznych, separowania izotopów itp.¹³ W tym czasie przeprowadzono pierwsze próby z aparaturą laserową do lokacji sputników, a także skonstruowano system łączy naziemnych i kosmicznych oraz urządzenia zapisu i obróbki informacji. Opracowano technologię przemysłowej produkcji laserowych dalmierzy geodezyjnych i artyleryjskich, a także oprzyrządowania laserowego wykorzystywanego w kartografii i budownictwie. Szeroko rozpowszechniła się interferometria laserowa, heterodynowe systemy optyczne do pomiaru prędkości przepływu strumieni, monitoringu atmosfery i oceanów oraz zwiadu geologicznego. Przystąpiono do produkcji seryjnej i badań klinicznych aparatury wykorzystywanej w biologii i medycynie. Technika laserowa opanowała wiele gałęzi przemysłu, przynosząc oszczędności materiałów, zmniejszając koszt wytworzenia produktu oraz zwiększając precyzję i jakość wyrobu. Z techniki laserowej korzysta także wojsko.

¹³ *Laser Applications*, ed. Moute Ross, Vol. 1, Academic Press, New York-London 1971.

Technika laserowa w Polsce rozwija się zgodnie z tendencjami światowymi. Tworzenie bazy zabezpieczenia metrologicznego techniki laserowej dotyczącej parametrów energetycznych i przestrzennych promieniowania laserowego rozpoczęto od wzorców dla przyrządów pomiarowych mocy i energii promieniowania laserowego¹⁴.

Metrologia optoelektroniczna obejmuje zagadnienia teoretyczne, prawne oraz praktyczne dotyczące jednostek miar, ich wzorców, metod pomiarów i oceny dokładności stosowanych przyrządów pomiarowych. Podstawowym zadaniem metrologii optoelektronicznej jest zapewnienie sprawności technicznej i legalności użytkowania optoelektronicznych przyrządów pomiarowych oraz dokładności i wiarygodności ich wskazań. Dokładność i wiarygodność wskazań przyrządów pomiarowych ma bezpośredni wpływ na decyzje o sposobie i zakresie użycia złożonych systemów techniki laserowej. Przejawia się to w skuteczności użycia tych systemów oraz rzetelności oceny ich stanu technicznego.

Wartość wielkości zmierzonej (np. moc czy energia impulsu promieniowania laserowego) decyduje o poprawności zastosowanej procedury w technice specjalnej, przy wykorzystaniu takich urządzeń jak dalmierze, wskaźniki celu, systemy kierowania ogniem, w dużych przemysłowych systemach laserowych wykorzystujących złożone procesy technologiczne, czy też w laserowych urządzeniach medycznych używanych w diagnostyce i terapii chorób itp. Błędne wskazania wielkości mierzonych, charakteryzujących parametry sprzętu laserowego, mogą być podstawą podjęcia błędnej decyzji o jego stanie technicznym. Konsekwencją takiej decyzji może być dopuszczenie do dalszego użytkowania sprzętu uszkodzonego lub skierowanie do naprawy sprzętu zdatnego do użycia, jeżeli przyrządy pomiarowe sygnalizowały uszkodzenie.

Wiarygodność wyników pomiarów oraz podjęte na ich podstawie decyzje są uzależnione od wykorzystywanych przyrządów pomiarowych, ich stanu technicznego, dokładności, wiarygodności wskazań. Problem ten nabiera szczególnego znaczenia w zautomatyzowanych systemach laserowych techniki specjalnej, wyposażonych w aparaturę diagnostyczną, która zbiera i przetwarza informacje oraz wypracowuje dane decyzyjne.

Złożoność zautomatyzowanych systemów tej techniki wymusza kontrolę metrologiczną aparatury diagnostycznej bezpośrednio u użytkownika. Stąd konieczność opracowania i badania przenośnych wzorców jednostki mocy i energii promieniowania laserowego. Wzorce przenośne, wykonane w wersji walizkowej umożliwiającej ich dużą mobilność, są przeznaczone do ochrony jednostki mocy i energii promieniowania laserowego i przekazania ich wielkości kontrolowanym metrologicznie przyrządom pomiarowym. Kalibracja wzorców przenośnych będzie możliwa na pod-

¹⁴ J. Owsik, *The essential aspects of metrological protection*, Laser technology IV: Research trends, instrumentation and applications in metrology and materials processing, 26–30 September 1993, Szczecin–Świnoujście 1995, Proceedings SPIE, Vol. 2202, s. 330–332; idem, *The tasks and problems of organization of optoelectronic laboratory for metrology*, [w:] ibidem, s. 333–335; idem, *Analiza rozwoju bazy systemu zabezpieczenia metrologicznego techniki laserowej w Polsce*, Metrology and Measuring Systems, t. II, z. 1, s. 73–80, Warszawa 1995; idem, *Podstawy zabezpieczenia metrologicznego laserometrii energetycznej w Polsce*, ibidem, s. 80–92.

stawie opracowanych wzorców jednostki mocy i energii promieniowania laserowego¹⁵. Ponad czterdziestoletnie doświadczenie w eksploatacji techniki laserowej doprowadziło w połowie lat dziewięćdziesiątych XX wieku do wniosku, że podczas prowadzenia eksperymentów bez aparatury metrologicznie atestowanej otrzymywano tylko przybliżoną ocenę mierzonych wielkości, a nie dokładne dane ilościowe. Przejście od ocen do pomiarów wymagało stworzenia podstaw krajowego systemu zabezpieczenia metrologicznego techniki laserowej. Wykorzystując doświadczenia Stanów Zjednoczonych, Niemiec, Rosji, opracowano i zbudowano bazę zabezpieczenia metrologicznego techniki laserowej¹⁶.

Własności promieniowania laserowego wymagały odpowiedniego zaprojektowania wzorców odtwarzających i urządzeń przekazywania ich parametrów. W miarę przechodzenia do urządzeń o mniejszej dokładności następuje rozszerzenie zakresu wszystkich parametrów pomiarowych sygnału optycznego: energetycznych, widmowych, czasowych i przestrzennych. Dokładność wzorca oraz innych ogniw łańcucha metrologicznego uczestniczących w przekazywaniu wielkości jednostki jest określona długością łańcucha metrologicznego, a ta z kolei zależy od zaplecza przyrządów pomiarowych i ich rozprzestrzenienia na terytorium kraju. Jeżeli zaplecze przyrządów pomiarowych jest dostatecznie duże, to konieczne wydaje się posiadanie kilku ogniw takiego łańcucha. Wymagania dokładności każdego z tych ogniw są ściśle określone. Odnosi się to także do początku łańcucha, tj. wzorca pierwotnego. Jeżeli zaplecze przyrządów pomiarowych jest nieduże i nie prognozuje się jego zwiększenia, to można ograniczyć się do jednego lub dwóch ogniw bazy metrologicznej.

Parametry i charakterystyki promieniowania laserowego można podzielić na energetyczne i częstotliwościowo-spektralne. Zgodnie z tym wprowadzono terminy: laserometria energetyczna i laserometria częstotliwościowo-spektralna. W laserometrii energetycznej najbardziej rozpowszechniły się przyrządy pomiarowe mocy i energii promieniowania laserowego, gdyż te parametry najbardziej interesują użytkownika. Wynikła w związku z tym konieczność rozwoju systemu zabezpieczenia metrologicznego laserometrii energetycznej. Baza metrologiczna i podporządkowanie urządzeń pomiarowych powinny odpowiadać ogólnie przyjętemu prawom metrologii i zasadom tworzenia państwowych schematów kontroli metrologicznej. Dlatego też podstawowym wymogiem przy opracowaniu wzorców i schematów kontroli metrologicznej w obszarze laserometrii energetycznej w Polsce była dokładność pomiarów, podyktowana potrzebami nauki i praktyki.

Przyjęto przy tym, że:

- odtworzeniu z maksymalną dokładnością podlega taka energetyczna jednostka wielkości fizycznej, do której pomiaru istnieje rozwinięte zaplecze przyrzą-

¹⁵ J. Owsik, *A basis for metrological protection of energy laserometry*, J. Techn. Phys. 1997, Vol. 38, No 1, s. 97–109.

¹⁶ A.A. Sanders, *The programs of the optical electronics metrology group*, NIST, Boulder, Colorado 1991; *Measurement, testing, calibration*, Physikalisch Technische Bundesanstalt, 1992; A.F. Kotyuk, J.T. Zagorskij, *Principles of metrological protection of laser energy photometry* (in Russian), Izdatielstwo Standartov 1990.

dów pomiarowych oraz która gwarantuje najwygodniejsze przejście do innych wielkości energetycznych;

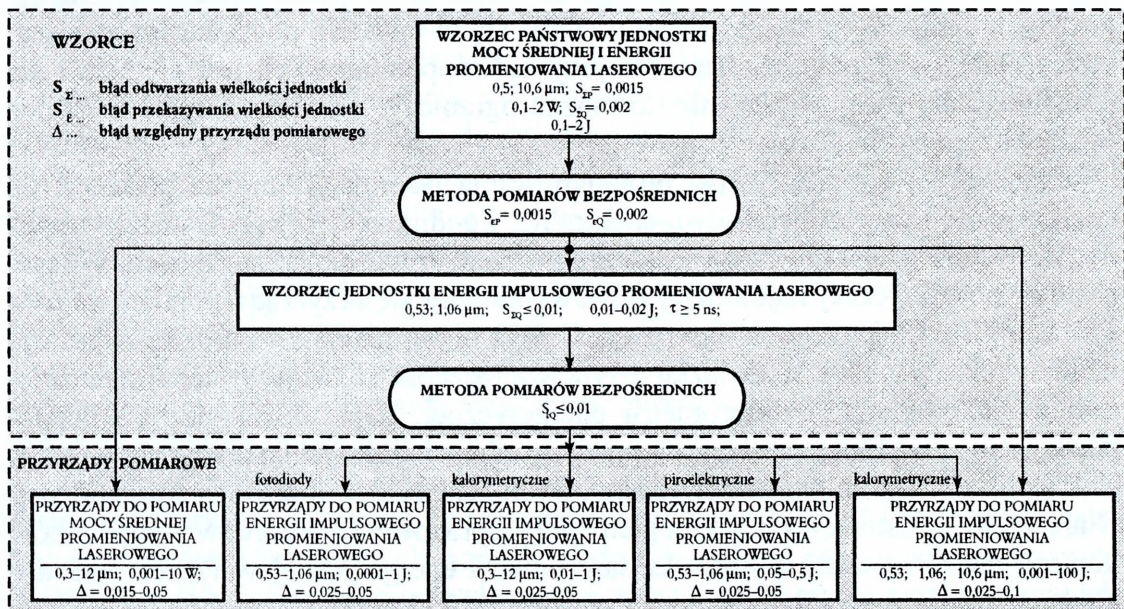
- odtworzeniu podlega zakres energetyczny i spektralny, który jest optymalny ze względu na przekazanie wielkości jednostki przyrządom pomiarowym przy jednoczesnym rozszerzeniu zakresu pomiarowego;

- stosunek błędów przyrządów pomiarowych należących do poszczególnych ogniw schematu kontroli metrologicznej powinien gwarantować właściwe sprawdzenie przyrządów pomiarowych wszystkich klas;

- urządzenia pomiarowe należące do wyższych ogniw schematu kontroli metrologicznej powinny mieć wspólną konstrukcję bazową;

- wzorcowy przetwornik pomiarowy wzorca powinien posiadać szeroką charakterystykę spektralną, aby możliwe było porównywanie wielkości jednostek zarówno w obszarze promieniowania koherentnego, jak i niekoherentnego.

Schemat odtwarzania podstawowych jednostek promieniowania laserowego, sposób ich przenoszenia i kolejność przekazywania jednostki mocy – wata (W) i jednostki energii – dżula (J) przyrządom pomiarowym tych wielkości fizycznych z podaniem niepewności pomiarowych i podstawowych metod kontroli przedstawiono na rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Struktura kontroli metrologicznej

Podstawowa aparatura polskiej bazy metrologicznej w laserometrii to:

- wzorzec jednostki mocy średniej i energii promieniowania laserowego do kontroli metrologicznej przyrządów pomiarowych dla długości fal 0,3–12 μm ;
- wzorzec jednostki energii impulsowego promieniowania laserowego do kontroli metrologicznej przyrządów pomiarowych pracujących na długościach fal 0,53 i 1,06 μm , dla niskich poziomów energii i krótkich czasów trwania impulsów.

KONTROLA METROLOGICZNA PRZYRZĄDÓW DO POMIARU MOCY ŚREDNIEJ PROMIENIOWANIA LASEROWEGO I ENERGII IMPULSOWEGO PROMIENIOWANIA LASEROWEGO W ZAKRESIE DŁUGOŚCI FAL 0,3–12,0 μm

Przedstawiona na rysunku 3.1 struktura kontroli metrologicznej dla przyrządów pomiarowych promieniowania zapewnia monitorowanie dużej liczby przyrządów znajdujących się w użyciu, różniących się charakterystykami spektralnymi, energetycznymi oraz dokładnością. Niższe ogniwo systemu kontroli metrologicznej stanowi *wzorzec jednostki energii*.

Na rysunku wyszczególniono:

- przyrządy do pomiaru energii typu kalorymetrycznego impulsowego promieniowania laserowego;
- przyrządy do pomiaru energii typu piroelektrycznego impulsowego promieniowania laserowego.

Obydwa wzorce są strukturalnie identyczne i zawierają:

- lasery metrologicznego przeznaczenia;
- układ optyczny, transformujący parametry wiązki promieniowania laserowego;
- przetwornik pomiarowy wielkości optycznej (mocy lub energii) przetwarzający ją w sygnał elektryczny;
- urządzenie obróbki automatycznej, rejestracji i przetwarzania informacji.

Przetwornikami pomiarowymi wielkości optycznej w sygnał elektryczny w obydwu wzorcach są odbiorniki promieniowania typu kalorymetrycznego. Urządzenia sterowania i obróbki informacji strukturalnie są identyczne, różnice występują w algorytmach funkcjonowania. Opracowanie i wykonanie wzorców o unikatowej dokładności charakterystyk eksploatacyjnych wymagało zastosowania nowych rozwiązań konstrukcyjnych, technologicznych i metrologicznych wszystkich ogniw schematu sprawdzającego.

Na podstawie dotychczasowych doświadczeń z funkcjonowania systemu oraz rysujących się tendencji rozwoju techniki laserowej w kraju można stwierdzić, że rozwój bazy metrologicznej pójdzie w kierunku bardzo małych mocy rzędu mikrowatów, co związane jest z szybkim rozwojem telekomunikacji (wymaga to zastosowania laserowego radiometru kriogenicznego) oraz w kierunku bardzo dużych mocy rzędu kilowatów, co wiąże się z rozwojem laserowych urządzeń technologicznych. Problem opracowania przenośnych wzorców jednostki mocy i energii promieniowania wynikał z rozwoju zautomatyzowanych systemów techniki laserowej, z którymi mamy do czynienia w technice wojskowej, w medycynie, w urządzeniach przemysłowych, a także badaniach naukowych. Poprawne działanie takiego systemu wymaga aparatury diagnostycznej stanowiącej jego nieod-

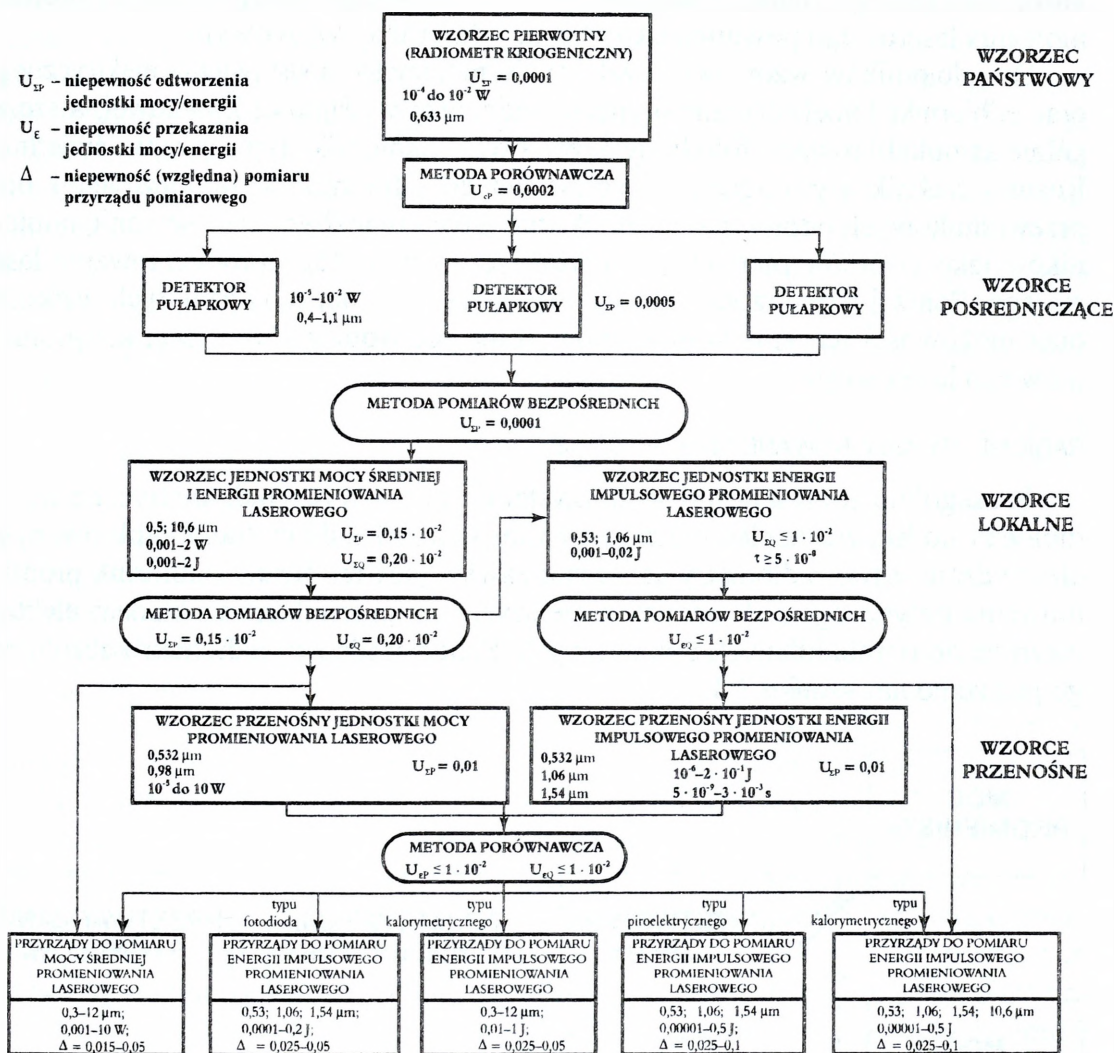
łączną część. W większości praktycznych przypadków kontrola metrologiczna aparatury diagnostycznej jest możliwa tylko u bezpośredniego użytkownika.

Przedstawione wymagania wymuszają konieczność opracowania nowego łańcucha porównań w metrologii promieniowania laserowego, uwzględniającego najnowsze, zarówno krajowe jak i światowe, tendencje rozwojowe techniki laserowej. Zapewnienie spójności pomiarowej w metrologii systemów wykorzystujących promieniowanie laserowe wymaga opracowania i ustalenia łańcucha porównań, który wskazywałby kolejność przekazywania jednostek wielkości pomiarowych, poczynając od wzorca pierwotnego i kończąc na wzorcach niższych rzędów. W zależności od wyboru wzorca pierwotnego oraz wzorców pośredniczących i wtórnych można utworzyć różne łańcuchy porównań. Jednakże, pomimo różnych możliwości wyboru wzorca pierwotnego w dziedzinie pomiarów promieniowania laserowego, nie udało się dotąd opracować jednolitego, pełnego łańcucha porównań opartego tylko na jednym wzorcu radiometrycznym. Rozwiązania dotyczące łańcuchów porównań i spójności pomiarowej wzorców radiometrycznych i fotometrycznych opisano w pracach Metzdorfa i Ohno¹⁷. Zarówno w Niemczech, jak i w Stanach Zjednoczonych jako wzorzec pierwotny stosuje się radiometr kriogeniczny.

Przystępując do opracowania nowego łańcucha porównań, założono, że łańcuch ten przede wszystkim powinien ukazywać przejścia od radiometru kriogenicznego jako wzorca pierwotnego do wzorców pośredniczących i wtórnych zapewniających pomiary mocy i energii promieniowania laserowego. Projekt łańcucha porównań przedstawiono na rysunku 3.2. Jako wzorce pośredniczące będą stosowane zarówno odbiorniki pułapkowe, jak i pojedyncze kalibrowane fotodiody krzemowe, germanowe i InGaAs. Radiometr kriogeniczny jest pierwszym i podstawowym ogniwem w łańcuchu porównań, będzie pracował z laserami stabilizowanymi, stanowiąc bazę dla wszystkich radiometrycznych pomiarów. Nowy łańcuch porównań w metrologii promieniowania laserowego przedstawia sposób odtwarzania i kolejność przekazywania wielkości jednostek promieniowania laserowego od wzorca pierwotnego przyrządom pomiarowym tych wielkości fizycznych z podaniem niepewności pomiarowych i podstawowych metod kontroli¹⁸.

¹⁷ J. Metzford, *Network and traceability of the radiometric and photometric standards at the PTB*, Metrologia 1993, Vol. 30, nr 4, s. 403–408; idem, *Traceability in optical radiometry: new developments. Advances in metrology and its role in quality improvement and global trade*, Narosa Publishing House, New Delhi 1996, s. 297–306; Y. Ohno, A.C. Parr, *NIST radiometric and photometric units based on absolute detectors*, An International Conference in Metrology, CSIR, Pretoria 1997.

¹⁸ J. Owsik, W. Skrzeczanowski, A. Długaszek, J. Janucki, M. Nowakowski, *Польская система метрологического обеспечения лазерной техники (Polski system metrologicznego zabezpieczenia techniki laserowej)*, Technologiczeskije Sistiemy 2002, No 3 (14), s. 5–10.



Rys. 3.2. Nowy łańcuch porównań w metrologii promieniowania laserowego

3.2. Wzorzec pierwotny w metrologii promieniowania laserowego

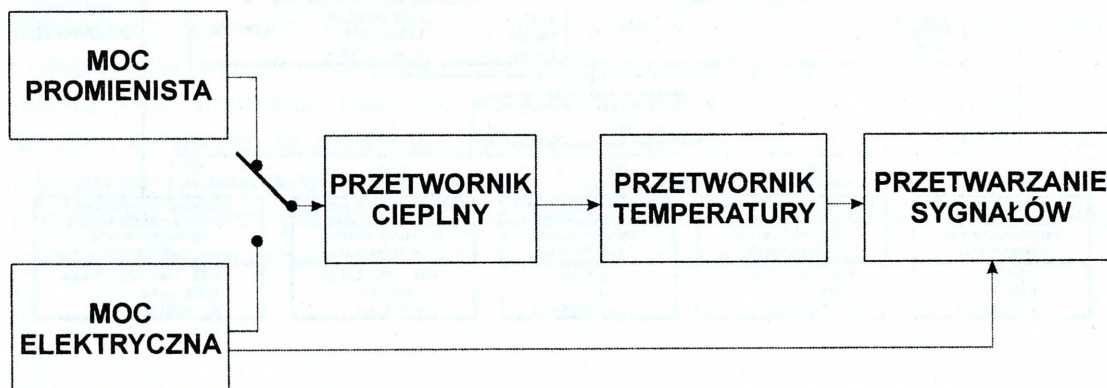
Pomiary wielkości radiometrycznych są oparte na porównaniach z odpowiednimi wzorcami. Duże zakresy pomiarowe mocy i energii powodują niezwykle złożoną metrologię promieniowania laserowego. Wybór prawidłowej strategii tworzenia schematu kontroli metrologicznej wymaga rozpatrzenia szeregu zagadnień. Główne z nich dotyczą wyboru zasady odtwarzania wielkości jednostki mocy pro-

mieniowania laserowego. W naszym przypadku rozważane mogą być albo wzorcowe źródło promieniowania, albo wzorcowy odbiornik promieniowania. W metrologii laserowej nie ma wariantów alternatywnych, dopóki laser jako źródło promieniowania nie będzie w stanie odtwarzać wielkości jednostki mocy jak źródło absolutne. Dlatego pomiar parametrów i charakterystyk energetycznych promieniowania laserowego powinien bazować na odbiorniku wzorcowym.

Do odbiorników wzorcowych zalicza się radiometry podstawienia elektrycznego oraz odbiorniki fotoelektryczne o znanej widmowej wydajności kwantowej, a szczególnie samokalibrowane fotodiody krzemowe i odbiorniki typu pułapki świetlnej. Rozwój technik wytwarzania nieselektywnych odbiorników termicznych i półprzewodnikowych odbiorników fotoelektrycznych umożliwił zastosowanie odbiorników jako wzorców pierwotnych i wtórnych w metrologii promieniowania laserowego. Poniżej rozpatrzono zalety i charakterystyki metrologiczne tych wzorców oraz możliwości ich stosowania jako wzorca pierwotnego w pomiarach promieniowania laserowego.

RADIOMETRY KALIBROWANE ELEKTRYCZNIE

Szczególnie przydatne do wykorzystania jako wzorce radiometryczne są radiometry podstawienia elektrycznego, zwane również radiometrami kalibrowanymi elektrycznie. Są to radiometry absolutne zawierające termiczny odbiornik promieniowania optycznego z dołączonym elektrycznym grzejnikiem i układem elektronicznym do obróbki danych pomiarowych. Schemat ideowy radiometru absolutnego pokazano na rysunku 3.3.



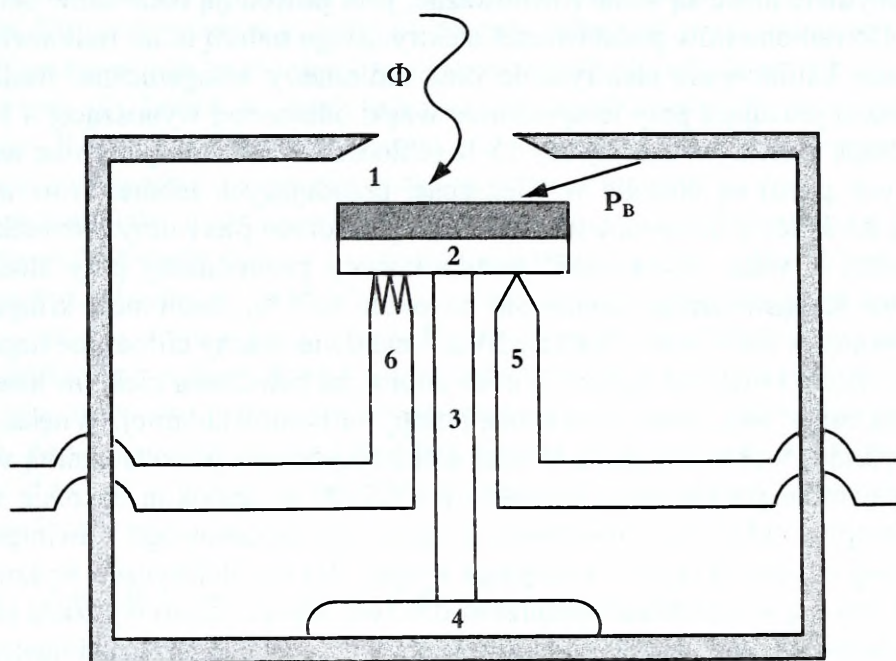
Rys. 3.3. Schemat radiometru absolutnego

Odbiornik radiometru przetwarza energię promienistą na ciepło i daje sygnał wyjściowy proporcjonalny do zmiany temperatury lub szybkości zmiany temperatury odbiornika. Odbiornik radiometru można także nagrzewać prądem elektrycznym, aż jego sygnał wyjściowy stanie się równy sygnałowi generowanemu przez promieniowanie laserowe. Zatem w radiometrach tego typu nieznaną moc promieniowania wyznacza się przez podstawienie znanej mocy elektrycznej, przy założe-

niu, że obydwie moce są sobie równoważne, jeśli powodują takie same skutki termiczne. Do radiometrów podstawienia elektrycznego należą m.in. radiometry piroelektryczne kalibrowane elektrycznie oraz radiometry kriogeniczne. Radiometry kriogeniczne pracujące przy temperaturze wnętrza odbiorczej wynoszącej 4 K (osłona chłodząca z ciekłym helem) lub 15 K (chłodzenie wskutek przemian termodynamicznych gazu) są obecnie w większości przodujących laboratoriów metrologicznych na świecie uznawane za uniwersalny wzorzec pierwotny jednostki mocy promienistej – wata. Niepewność pomiaru mocy promienistej przy stosowaniu radiometru kriogenicznego ocenia się na około 0,01%. Radiometr kriogeniczny zainstalowany w Głównym Urzędzie Miar¹⁹ ma dwie osłony chłodzące napełnione ciekłym azotem i ciekłym helem. Wnęka odbiorcza chłodzona ciekłym helem pracuje w próżni wytworzonej za pomocą pompy turbomolekularnej. Wnęka mająca kształt cylindra wykonana jest z miedzi elektrolitycznej i pokryta czarną warstwą o współczynniku pochłaniania wynoszącym 0,9998 w szerokim zakresie widmowym. Grzejnik radiometru wykonano z drutu konstantanowego nawiniętego na zewnętrznej stronie cylindra tworzącego wnękę. Złącza elektryczne wykonane są z niobu i pracują w warunkach nadprzewodnictwa, a więc ciepło wydziela się tylko w drucie konstantanowym. Promieniowanie laserowe wchodzi do radiometru przez okienko w postaci płytki kwarcowej umieszczonej w specjalnym uchwycie umożliwiającym ustawienie okienka pod kątem Brewstera dla danej długości fali wiązki laserowej, co zapewnia jej optymalne warunki przechodzenia. Schemat części odbiorczej radiometru pokazano na rysunku 3.4. Mierzony strumień promieniowania Φ wraz z promieniowaniem tła P_B jest pochłaniany przez wyczerzoną powierzchnię (1) wnętrza odbiorczej. Promieniowanie nagrzewa wnękę odbiorczą (2), aż do powstania stanu równowagi wyznaczonego przez strumień promienisty i opór cieplny złącza (3) łączącego odbiornik z blokiem pochłaniającym ciepło (4).

Stanowi równowagi odpowiada określona temperatura równowagi T_r , którą mierzy się germanowym termometrem oporowym (5). Przesłaniając wiązkę promieniowania, zatrzymuje się nagrzewanie promieniste odbiornika. Następnie zostaje włączona moc elektryczna i grzejnikiem oporowym radiometru (6) podgrzewa się wnękę odbiorczą do temperatury T_r . Pomijając różnice między procesami nagrzewania elektrycznego i promienistego, można przyjąć, że mierzony strumień promieniowania optycznego jest równy mocy elektrycznej wydzielonej w układzie grzejnym.

¹⁹ J. Pietrzykowski, *Wzorzec pierwotny jednostki mocy promienistej oparty na radiometrze kriogenicznym*, Krajowy Kongres Metrologii, Gdańsk, 15–18.09.1998 r., s. 139–145.



Rys. 3.4. Schemat części odbiorczej radiometru kriogenicznego

1 – czarna powierzchnia pochłaniająca; 2 – odbiornik; 3 – złącze termiczne, 4 – blok pochłaniający ciepło; 5 – germanowy termometr oporowy; 6 – grzejnik elektryczny.

3.3. Odbiorniki pałapkowe

Dokładne poznanie przebiegu przetwarzania fotonów na elektrony w krzemowych fotodiodach półprzewodnikowych doprowadziło do opracowania przez Geista metody samokalibracji czułości widmowej fotodiod²⁰. Metoda samokalibracji czułości widmowej fotodiod krzemowych, polegająca na określeniu wydajności przetwarzania fotonów na elektrony przy równoczesnym uwzględnieniu strat odbiciowych i rekombinacyjnych, jest obecnie stosowana w wielu laboratoriach pomiarowych. Skutkuje to licznymi zastosowaniami fotodiod krzemowych jako wzorców absolutnych i pośredniczących. Zależność wiążąca czułość widmową bezwzględną z widmową wydajnością kwantową ma postać:

$$s(\lambda) = \frac{[1 - \rho(\lambda)] \varepsilon(\lambda) \lambda}{K} \quad (3.1)$$

²⁰ J. Geist, *On the possibility of an absolute radiometric standard based on the quantum efficiency of a silicon photodiode*, Proc. SPIE 1979, Measurements of Optical Radiations, Vol. 196, s. 75–83.

gdzie:

- $s(\lambda)$ – czułość widmowa, AW^{-1} ,
- $\rho(\lambda)$ – widmowy współczynnik odbicia,
- $\varepsilon(\lambda)$ – widmowa wydajność kwantowa wewnętrzna,
- λ – długość fali, nm,
- $K = 1239,85 \text{ nm WA}^{-1}$.

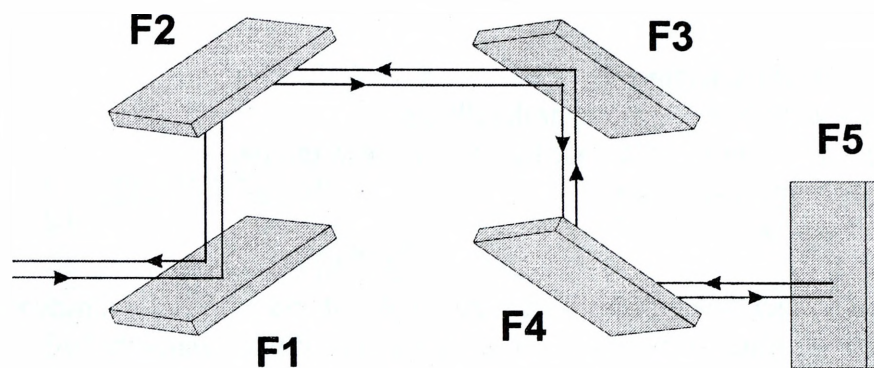
Z powyższej zależności wynika, że do określenia czułości widmowej fotodiody wystarcza wyznaczyć widmowy współczynnik odbicia warstwy SiO_2 na krzemie oraz wewnętrzną widmową wydajność kwantową fotodiody, zależną od strat rekombinacyjnych. Części strat rekombinacyjnych można uniknąć przez stosowanie fotodiod krzemowych z warstwą inwersyjną. Pozostałe straty można wyeliminować lub istotnie zmniejszyć, przykładając odpowiednie napięcie polaryzujące.

W celu dalszego uproszczenia zależności (3.1), poprzez wyeliminowanie z niej wartości współczynnika odbicia, tworzy się specjalne konfiguracje fotodiod krzemowych, zawierające trzy, cztery lub więcej fotodiod. W takim układzie, zwanym pułapkowym, wiązka promieniowania padając na kolejne fotodiody ulega częściowemu odbiciu, a resztkowy, widmowy współczynnik odbicia układu $\rho_r(\lambda)$ związany jest z widmowym współczynnikiem odbicia pojedynczej fotodiody zależnością:

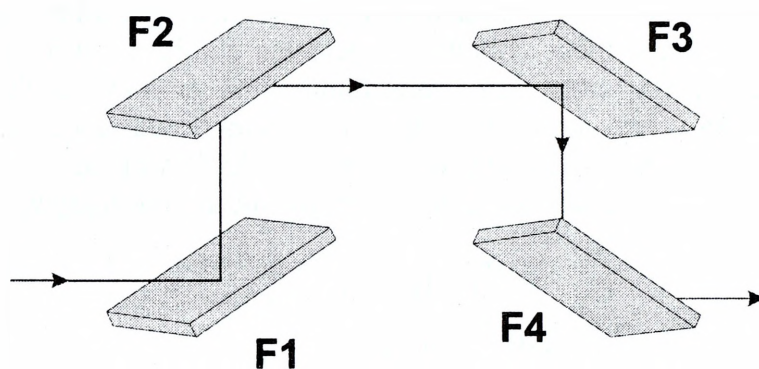
$$\rho_r(\lambda) = [\rho(\lambda)]^n \quad (3.2)$$

gdzie n jest ilością odbić od wszystkich fotodiod.

Schematy konfiguracji odbiorników pułapkowych typu odbiciowego i transmisyjnego pokazano na rysunku 3.5. Zarówno samokalibrowane fotodiody krzemowe, jak i zbudowane z nich odbiorniki typu pułapki świetlnej mogą pełnić rolę wzorca pierwotnego jednostki czułości widmowej o względnej niepewności około 0,1%, jednak ich zasadniczymi ograniczeniami są nieduży przedział widmowy i wymagana mała rozbieżność kątowa wiązki pomiarowej. Metodę samokalibracji oraz stosowanie odbiorników pułapkowych można rozszerzyć na fotodiody InGaAs , czułe na bliską i średnią podczerwień, jednak są one nadal bardzo drogie, jeśli ich powierzchnia czynna ma być dostatecznie duża do stosowania w pomiarach radiometrycznych.



a)



b)

Rys. 3.5. Schemat odbiornika pułapkowego: a) typu odbiciowego, b) typu transmisyjnego

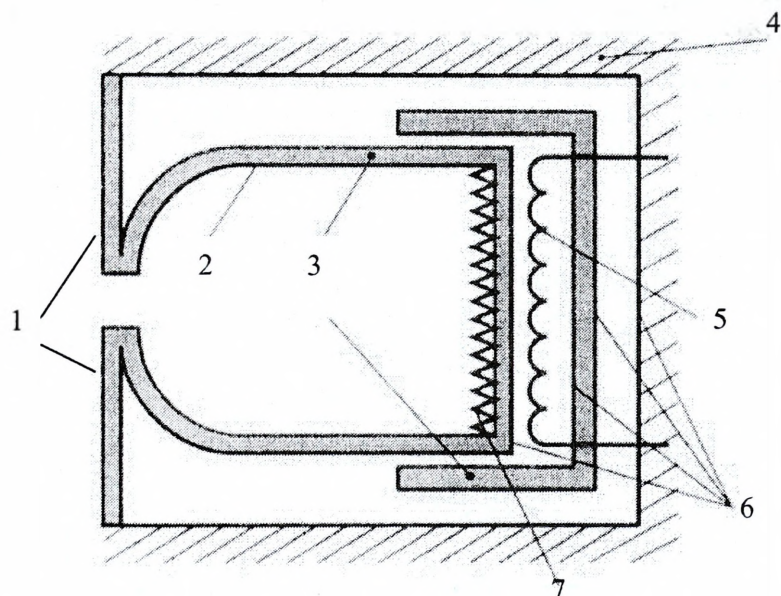
3.4. Przetworniki pomiarowe wzorców mocy i energii promieniowania laserowego

Prawidłowy wybór strategii tworzenia bazy metrologicznej w laserometrii energetycznej wymaga wyboru prawa fizycznego odtworzenia wielkości jednostki energetycznej promieniowania.

Ponieważ laser jako źródło promieniowania nie jest w stanie odtworzyć wielkości jednostki energetycznej, zatem skala energetyczna w obszarze pomiaru parametrów i charakterystyk promieniowania laserowego powinna bazować na wzorcowym przetworniku pomiarowym. Wybór prawa fizycznego budowy takiego przetwornika (typu cieplnego, fotoelektrycznego itp.) jest podyktowany potrzebami i możliwościami technologicznymi.

Analiza dróg i perspektyw opracowania bardzo dokładnych przetworników pomiarowych mocy i energii promieniowania laserowego wykazała, że istnieje tylko jeden sposób pomiaru promieniowania laserowego zapewniający najwyższą

dokładność, jest to pomiar typu kalorymetrycznego²¹. Dokładność przetworników pomiarowych tego typu przewyższa obecnie dokładność przetworników wykonanych na bazie modelu ciała absolutnie czarnego. Opracowane wzorce mocy i energii promieniowania laserowego (wzorzec pierwotny, WP) oraz energii impulsowego promieniowania laserowego (wzorzec wtórny, WW) także opierają się na posiadających unikalne dokładności przetwornikach pomiarowych (PP) typu kalorymetrycznego²². Konstrukcję odbiornika PP WP przedstawiono na rysunku 3.6.



Rys. 3.6. Konstrukcja odbiornika PP WP

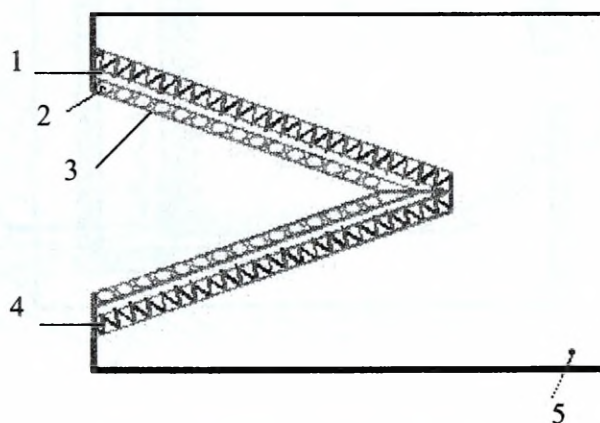
1 – stos termopar; 2 – złoto; 3 – miedź; 4 – termostat (miedź); 5 – spirala grzejna (stop niklu z chromem); 6 – nikiel; 7 – powierzchnia rowkowana (miedź), pokryta farbą 3M.

²¹ T.V. Higgins, *Thermal detectors fell the heat of light*, Laser Focus World 1994, Vol. 30, No 11, s. 65–73; T. Li, S.D. Sims, *A calorimeter for energy measurements of optical masers*, Appl. Optics 1962, Vol. 1, No 3, s. 325–328; J.G. Edwards, *An accurate carbone cone calorimeter for pulsed lasers*, J.Sci.Instrum. 1967, Vol. 44, s. 835–838; S. Koozekanani, S.S. Deybe, A. Krutchkoff, M. Ciftan, *Measurements of the laser output*, Proc. IRE 1962, Vol. 50, No 2, s. 207; J.A. Calviello, *An optical calorimeter for laser energy measurements*, Proc. IEEE 1963, s. 611; D.E. Killick, D.A. Batman, D.R. Brown et al., *Power and energy measuring technique foe solid state lasers*, Infrared Physics 1966, Vol. 6, s. 85–109; B.F. Scott, *Fabrication and performance of cone calorimeters for laser energy measurements*, J.Sci.Instrum. 1966, Vol. 43, s. 685–687; G. Birnbaum, N. Birnbaum, *Measurement of laser energy and power*, Proc. IEEE 1967, Vol. 55, No 6, s. 1026–1031; S.E. Smathers, G. Maksymonko, *Calorimetric measurement of optical power from pulsed lasers*; IEEE Transactiob on Instrumentation and Measurement 1972, IM-21, Vol. 4, s. 430–433; J. Owsik, A.F. Kotyuk, A.A. Liberman, M.V. Ulanowski, *An apparatus for measuring the energy of pulse radiation of a laser*, J.Tech.Phys. 1995, Vol. 36, No 4, s. 421–428; J. Owsik, *Absorption coefficient of calorimetric receiver of laser radiation*, J.Tech.Phys. 1966, Vol. 37, No 1, s. 3–6; R. Nowicki, *Pomiary energii promienistej*, WNT, Warszawa, 1969.

²² J. Owsik, *Współczynnik absorpcji odbiornika kalorymetrycznego wzorca jednostki mocy średniej promieniowania laserowego*, Metrology and Measuring Systems 1995, t. II, z. 3, s. 236–239.

W wyniku zaabsorbowania promieniowania laserowego przez powierzchnię rowkowaną wydziela się ciepło, które poprzez obudowę przenika do termostatu. Na stosie termopar generuje się sygnał wyjściowy, którego wartość jest proporcjonalna do mocy impulsu laserowego. Celem określenia mocy promieniowania laserowego porównuje się sygnały ze stosu termopar rejestrowane: a) podczas padania na odbiornik promieniowania laserowego, b) podczas propagacji ciepła generowanego przez moc elektryczną (o znanej wartości) wydzielaną w spirali grzejnej odbiornika. Przy równowartości tych sygnałów moc optyczna jest równa mocy elektrycznej. Identyczna jest zasada pomiaru energii przez odbiornik PP WW²³, którego konstrukcję przedstawiono na rysunku 3.7.

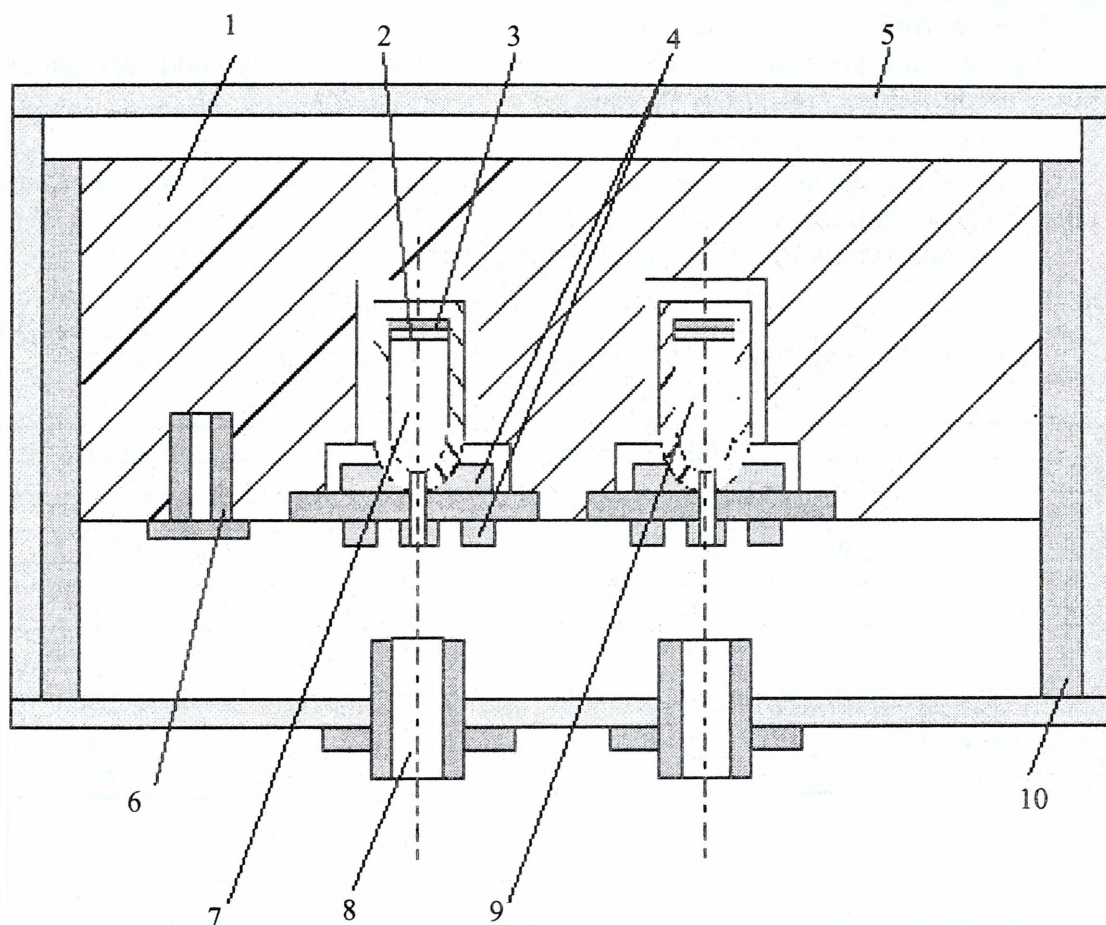
Na rysunku 3.8 przedstawiono pełny widok przetwornika pomiarowego typu kalorymetrycznego. Zawiera on dwa identyczne odbiorniki: roboczy i kompensacyjny, umieszczone w termostacie, połączone ze sobą w celu kompensacji szumów otoczenia.



Rys. 3.7. Konstrukcja odbiornika PP WW

- 1 – stożek wyrównujący (miedź); 2 – spirala grzejna; 3 – element odbiorczy – stożek tantalowy;
4 – stos termopar; 5 – termostat (miedź pokryta nikiem).

²³ J. Owsik, A.F. Kotyuk, A.A. Liberman, M.V. Ulanowsky, *Aparatura metrologiczna do pomiaru energii impulsowego promieniowania laserowego*, Metrology and Measuring Systems 1995, t. II, z. 3, s. 241–248; J. Owsik, *Metrological instruments for energy measurements of laser working with Q-modulation*, Laser in research and engineering, Proceedings of the 12th international congress Laser 95, Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg 1996, s. 722–729.



Rys. 3.8. Konstrukcja PP WP

1 – termostat; 2 – element odbiorczy; 3 – uzwojenie grzejnika; 4 – stos termopar; 5 – korpus;
6 – termistor; 7 – odbiornik roboczy; 8 – tulejka; 9 – odbiornik kompensacyjny; 10 – płytki izolacyjna.

Formuła opisująca wielkość mocy promieniowania laserowego rejestrowaną przez PP jest następująca:

$$P = \frac{(V_{ko} - V_p)U \cdot U_1}{(V_k - V_p)R_o K K_T \alpha} \quad (3.3)$$

gdzie:

V_p – wartość początkowa sygnału wyjściowego PP,

V_{ko} – wartość końcowa sygnału wyjściowego PP (spowodowanego oddziaływaniem promieniowania laserowego),

U – napięcie prądu stałego na spirali grzejnej PP podczas kalibracji,

U_1 – napięcie na oporniku wzorcowym umieszczonym w obwodzie spirali grzejnej podczas oddziaływania na PP mocy prądu stałego,

R_0 – oporność opornika wzorcowego,

V_k – wartość końcowa sygnału wyjściowego PP (wywołanego oddziaływaniem mocy prądu stałego podczas kalibracji),

α – współczynnik pochłaniania odbiornika,

K_T – współczynnik ekwiwalentności strat cieplnych podczas oddziaływania optycznego i elektrycznego na PP,

K – współczynnik uwzględniający dryft sygnału wyjściowego PP.

Tabela 3.1

PARAMETRY PRZETWORNIKA POMIAROWEGO WZORCA JEDNOSTKI MOCY
I ENERGII PROMIENIOWANIA LASEROWEGO

Rodzaj parametru	Zakres wartości
błąd podstawowy [%]	0,2
długość fali promieniowania laserowego [μm]	0,5–10,6
zakres odtwarzania wartości mocy średniej [W]	0,1–2
współczynnik przetwarzania przy pomiarach mocy elektrycznej $0,9 \pm 0,1$ W, [V/W]	$\geq 5 \cdot 10^{-3}$
różnica współczynników przetwarzania mocy elektrycznej dla odbiorników roboczego i kompensacyjnego [%]	≤ 5
średnica otworu wejściowego [mm]	8
stała czasowa [s]	≤ 100
oporność termobaterii [Ω]	≤ 700

Tabela 3.2

PARAMETRY PRZETWORNIKA POMIAROWEGO WZORCA JEDNOSTKI ENERGII
IMPULSOWEGO PROMIENIOWANIA LASEROWEGO

Rodzaj parametru	Zakres wartości
błąd podstawowy [%]	1
zakres pomiaru energii dla długości fal 0,48–1,06 μm [J]	$(10^{-2}–10)$
czas trwania impulsów promieniowania [s]	$(1–10^{-8})$
maksymalna gęstość mocy impulsu [W/cm^2]	$\leq 10^8$
współczynnik przetwarzania energii [mV/J]	(5–8)
minimalna średnica wiązki [mm]	3
średnica okna wejściowego [mm]	≥ 15
czas między dwoma pomiarami [min]	≤ 5
oporność wyjściowa [$\text{k}\Omega$]	≤ 5
oporność uzwojenia kalibracji elektrycznej [Ω]	200

Wartości V_{ko} , V_p , V_k , U , U_1 mierzone są podczas pracy PP. Wartość R_0 przedstawiona jest w jego instrukcji. Zatem określenie mocy P związane jest z pomiarem α , K_T i K dokonywanym podczas konstrukcji PP.

Jedną z podstawowych charakterystyk metrologicznych PP jest jego błąd, określany sumowaniem błędów składowych pomiaru wszystkich wielkości wchodzących do wzoru (3.3).

W tabelach 3.1 i 3.2 przedstawiono przykładowe wyniki atestacji metrologicznej przetwornika pomiarowego WP i WW.

3.5. Przyrządy pomiarowe

W przedstawionym schemacie spójności pomiarowej będą wykorzystywane przyrządy do pomiaru:

- energii typu kalorymetrycznego impulsowego promieniowania laserowego w zakresie $1 \cdot 10^{-3}$ – $1 \cdot 10^{-2}$ J na długościach fal 0,53; 1,06; 1,54 i 10,6 μm ;
- energii typu piroelektrycznego impulsowego promieniowania laserowego dla zakresu $1 \cdot 10^{-5}$ –0,5 J na długościach fal 0,53; 1,06; 1,54 μm ;
- energii typu kalorymetrycznego impulsowego promieniowania laserowego dla zakresu $1 \cdot 10^{-2}$ –1 J na długościach fal 0,3–12 μm ;
- mocy promieniowania laserowego dla zakresu 0,001–10 W na długościach fal 0,3–12 μm ;

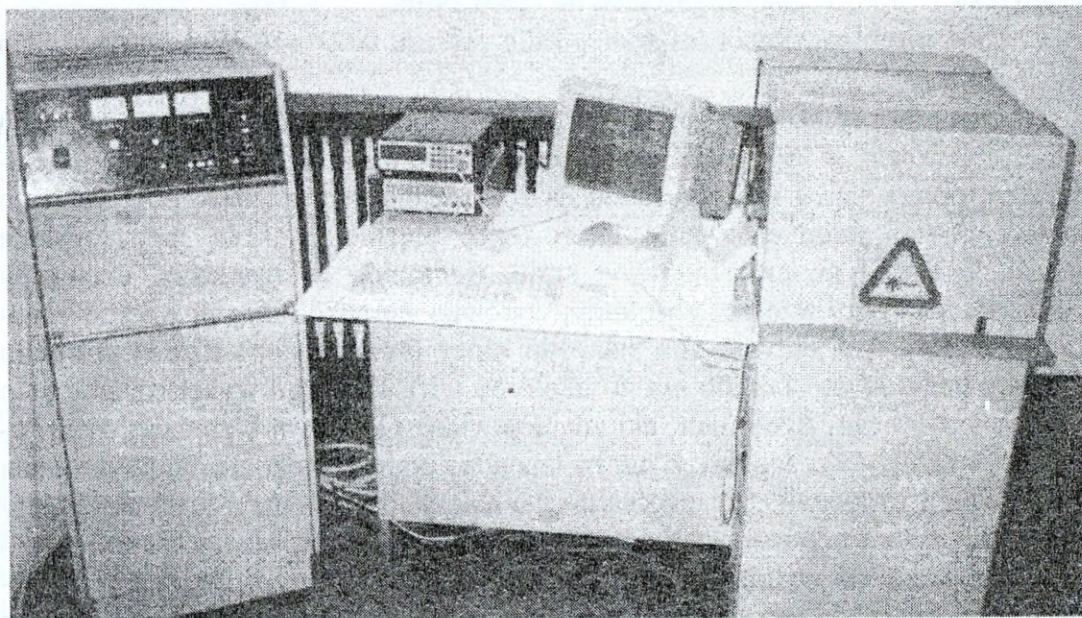
Zaproponowany schemat spójności metrologicznej przyrządów pomiarowych techniki laserowej, w którym jako wzorzec pierwotny zastosowano radiometr kriogeniczny, opiera się na wykorzystaniu najdokładniejszych urządzeń pomiarowych mocy i energii promieniowania laserowego, objęcie kontrolą metrologiczną wszystkich tego typu przyrządów w kraju. Radiometr kriogeniczny, uznawany obecnie za najlepszy wzorzec absolutny, wyróżnia się wśród innych wzorców najniższą niepewnością odtwarzania jednostki mocy promienistej i bardzo szerokim zakresem widmowym (od 200 nm do około 50 μm), stąd jego wykorzystanie jako wzorca pierwotnego. Radiometr taki znajduje się w Głównym Urzędzie Miar. Pozostałe elementy poszczególnych ogniw łańcucha pomiarowego będą przedmiotem opracowania i wdrożenia. Szczególną uwagę należy tu zwrócić na detektory pułapkowe, mobilne wzorce jednostek mocy i energii promieniowania laserowego, których opracowanie i wykonanie wymaga zastosowania i wykorzystania najnowszych osiągnięć nauki i techniki. Niewątpliwą zaletą detektorów pułapkowych oraz wzorców przenośnych jest możliwość przeprowadzenia kontroli metrologicznej bezpośrednio w siedzibie klienta, jak również wykonywania międzylaboratoryjnych badań porównawczych.

WZORCE SYSTEMU ODTWARZANIA SKALI JEDNOSTEK RADIOMETRYCZNYCH W TECHNICIE LASEROWEJ

4.1. Wzorzec jednostki mocy średniej i energii promieniowania laserowego

4.1.1. Przesłanki opracowania wzorca

Wzorzec jest przeznaczony do ochrony i odtwarzania wielkości jednostek mocy i energii promieniowania laserowego, a następnie ich przekazania kontrolowanym metrologicznie przyrządom pomiarowym (urządzeniom do pomiaru mocy i energii promieniowania laserowego) znajdującym się w użyciu w Polsce²⁴. Zdjęcie wzorca przedstawiono na rysunku 4.1.



Fot. M.M.

Rys. 4.1. Wzorzec jednostki mocy średniej i energii promieniowania laserowego

Ochrona wielkości jednostki wata i dżula w laserometrii z dużą dokładnością w okresie długiego okresu (kilka lat) jest możliwa z wykorzystaniem specjalnie opracowanego i metrologicznie przebadanego przetwornika pomiarowego typu kalorymetrycznego. Przetwornik powinien być nieselektywny w szerokim zakresie długości fal promieniowania laserowego.

²⁴ J. Owsik, *Wzorce wielkości energetycznych dla techniki laserowej*, [w:] *Metrologia i systemy pomiarowe*, PWN, Warszawa 1998, t. V, z. 1-2, s. 61-79; idem, *Polish metrological basis for the study of lasers*, Proc. SPIE 1999, Vol. 4018, s. 50-54.

Odbiornik przetwornika, pracujący na zasadzie porównania mocy optycznej z mocą elektryczną, oraz elektroniczna aparatura pomiarowa umożliwiają ochronę i odtwarzanie jednostki mocy i energii.

Przekazanie wielkości obu jednostek jest możliwe tylko przy wykorzystaniu laserów metrologicznych. Lasery te różnią się od zwykłych laserów podwyższoną stabilnością parametrów promieniowania. Wiązka laserowa wprowadzona jest zarówno do przetwornika pomiarowego wzorca (PPW), jak i przetwornika pomiarowego (PP), któremu przekazywana jest wielkość jednostki. Wielkość jednostki mocy przekazywana jest metodą bezpośrednią za pomocą lasera ciągłego działania. Celowe jest odtwarzanie wielkości jednostki energii impulsowego promieniowania laserowego jako pochodnej jednostki mocy średniej lasera ciągłego działania, z wykorzystaniem zaworu elektromechanicznego wycinającego impuls prostokątny o dokładnie znanej długości z promieniowania lasera ciągłego działania. W procesie przekazania wielkości jednostki mocy uczestniczy część wzorca zawierająca formujący układ optyczny i dzielnik promieniowania laserowego.

Opracowany wzorzec PPW i przetwornik kontrolowanego przyrządu pomiarowego przyjmują jednocześnie wiązki tego samego lasera, padające na ich wejście z dzielnika optycznego. Optymalnym wariantem jest tutaj przypadek, kiedy wyjściowa wiązka promieniowania laserowego dzieli się dokładnie w stosunku 1:1²⁵. Niezbędny w tym przypadku jest dzielnik optyczny atestowany metrologicznie. Dla rozpatrywanego wzorca takim dzielnikiem jest odbiciowa siatka dyfrakcyjna o „głębokim” profilu nacięć.

Zaletą takiego rozwiązania jest jednoczesne padanie promieniowania na oba przetworniki. W wyniku tego praktycznie odpada konieczność stabilizacji parametrów lasera i odpowiednio skraca się czas niezbędny do przekazania wielkości jednostki mocy i energii.

4.1.2. Schemat wzorca

Schemat wzorca przedstawiono na rysunku 4.2. Ze schematu wynika, że podstawowymi blokami są: dwa lasery z systemem zwierciadeł kierujących, aparatura przekazania wielkości jednostki, aparatura pomiaru mocy średniej i energii oraz aparatura sterowania wzorcem²⁶.

Podczas odtwarzania wielkości jednostki głównym elementem wzorca decydującym o jego dokładności jest przetwornik pomiarowy wzorca (PPW), a podczas przekazywania wielkości jednostki – dzielnik dyfrakcyjny.

Zgodnie ze schematem proces przekazania wielkości jednostki przez wzorzec kontrolowanemu przetwornikowi pomiarowemu przebiega następująco. Promieniowanie laserowe o długości fali 0,5 μm lub 10,6 μm przechodzi przez układ optyczny i pada

²⁵ J. Owsik, A.F. Kotyuk, A.A. Liberman, M.V. Ulanowsky, *Application of diffraction gratings as splitters of laser radiation*, J.Tech. Phys. 1995, Vol. 36, No 3, s. 351–357.

²⁶ Długaszek, Z. Jankiewicz, J. Owsik, *Standards of energetic units for laser technique*, Laser Technology V, 23–27 September 1996, Szczecin–Swinoujście 1997, Proceedings SPIE, Vol. 3186, s. 394–406.

na dzielnik mocy (energii) na siatce dyfrakcyjnej. Dyfragujące w „+1” i „-1” rzędy o jednakowej mocy (z dokładnością do błędu dzielenia) są kierowane w wejściowe apertury PPW i kontrolowanego PP. Sygnały wyjściowe z przetworników są wprowadzane do aparatury sterowania WP, która umożliwia kontrolę procesu odtwarzania i przekazania wielkości jednostki a także rejestrację i obróbkę informacji pomiarowej.

Podczas przekazania wielkości jednostki energii w tor optyczny wprowadza się zawór elektromechaniczny, wycinający impuls promieniowania z dokładnie normowanym czasem trwania.

4.1.3. Zasada odtworzenia i przekazania wielkości jednostki mocy średniej

W celu uzyskania dużej dokładności przy odtwarzaniu i przekazaniu wielkości jednostki mocy średniej promieniowania laserowego celowo jest wybrać dla PP taki sam przetwornik pomiarowy, jaki posiada wzorzec. Analogiczna konstrukcja i parametry obu przetworników pozwalają praktycznie wyeliminować błąd systematyczny przekazania wielkości jednostki.

Procedura odtworzenia i przekazania wielkości jednostki mocy średniej składa się z trzech etapów.

W pierwszym etapie mamy do czynienia tylko z przetwornikiem wzorca, scharakteryzowanym współczynnikiem ekwiwalentności K_1 zamiany mocy optycznej na moc elektryczną. Do odbiornika roboczego i identycznego odbiornika kompensacyjnego podawane są jednocześnie moc optyczna P_{opt} i moc elektryczna P_{el} . Mierzone są ich wyjściowe sygnały elektryczne V_1 (z wyjścia odbiornika roboczego) i V_2 (z wyjścia odbiornika kompensacyjnego).

W drugim etapie na odbiornik roboczy i kompensacyjny wzorca i kontrolowanego przetwornika pomiarowego jednocześnie podaje się jednakową moc elektryczną i mierzy sygnały wyjściowe odbiorników przetwornika wzorca $U_{r.wz.}$, $U_{k.wz.}$ i kontrolowanego przetwornika pomiarowego $U_{r.k.}$, $U_{k.k.}$, po czym oblicza się stosunki sygnałów wyjściowych:

$$M = \frac{U_{r.wz.}}{U_{k.wz.}}; N = \frac{U_{r.k.}}{U_{k.k.}} \quad (4.1)$$

W trzecim etapie dokonuje się jednoczesnego podania mocy optycznej i elektrycznej na oba przetworniki, przy czym równolegle P_{opt} jest podawana do odbiorników roboczych, a moc elektryczna P_{el} – do odbiorników kompensacyjnych obu przetworników. Mierzy się sygnały wyjściowe odbiornika roboczego V_3 i kompensacyjnego V_4 kontrolowanego PP oraz powtórnie mierzy się sygnały V_1 i V_2 oznaczone teraz jako V_1' i V_2' .

Na podstawie pomiarów określa się wielkość odtwarzanej jednostki mocy średniej promieniowania laserowego:

$$P_{opt} = \frac{1}{M \cdot K_1} \cdot \frac{V_1'}{V_2'} \cdot P_{el} \quad (4.2)$$

a także współczynnik ekwiwalentności K_2 zamiany mocy optycznej na moc elektryczną kontrolowanego przetwornika pomiarowego:

$$K_2 = \frac{K_1 \cdot V_3 \cdot V_2'}{V_1' \cdot V_4} \cdot \frac{M}{N} \quad (4.3)$$

Współczynnik ekwiwalentności K_2 jest wynikiem przekazania wielkości jednostki mocy średniej przez wzorzec kontrolowanemu przyrządowi pomiarowemu z kalorymetrycznym przetwornikiem pomiarowym posiadającym uzwojenie elektryczne do porównania mocy optycznej z elektryczną. Kontrolowanymi przyrządami pomiarowymi mogą być urządzenia z cieplnymi przetwornikami pomiarowymi innych typów (pieroelektryczne, bolometryczne itp.).

4.1.4. Zasada odtworzenia i przekazania wielkości jednostki energii

Przy odtwarzaniu wielkości jednostki energii, zaworem elektromechanicznym wycina się z promieniowania lasera ciągłego działania impuls prostokątny o czasie trwania τ_{opt} , który jest mierzony z dużą dokładnością. Energia zatem określana jest następująco:

$$Q_{opt} = P_{opt} \cdot \tau_{opt} \quad (4.4)$$

gdzie P_{opt} wyznacza się z wzoru 4.2.

Na uzwojenie elektryczne kontrolowanego przetwornika pomiarowego podawany jest impuls energii elektrycznej zgodnie z zależnością:

$$Q_{el} = P_{el} \cdot \tau_{el} = I \cdot U \cdot \tau_{el} \quad (4.5)$$

gdzie:

P_{el} – moc elektryczna w uzwojeniu kontrolowanego PP,

τ_{el} – czas trwania impulsu elektrycznego,

I, U – prąd w uzwojeniu i napięcie na jego zaciskach.

Wynikiem przekazania wielkości jednostki energii impulsowego promieniowania laserowego jest wartość współczynnika ekwiwalentności K_3 zamiany energii optycznej na energię elektryczną w kontrolowanym przetworniku pomiarowym.

$$K_3 = \frac{V_{opt}}{P_{opt} \cdot \tau_{opt}} \cdot \frac{P_{el} \cdot \tau_{el}}{V_{el}} \quad (4.6)$$

gdzie:

V_{opt}, V_{el} – sygnały wyjściowe z kontrolowanego PP po podaniu energii optycznej i elektrycznej.

4.1.5. Badania metrologiczne wzorca pierwotnego

Podczas odtwarzania wielkości jednostki głównym elementem wzorca decydującym o jego dokładności jest przetwornik pomiarowy, a podczas przekazywania wielkości jednostki jest dzielnik dyfrakcyjny.

Błąd wzorca podstawowego jest określany podczas porównywania go z wzorcem pierwotnym (w tym przypadku rosyjskim). Na błąd ten składają się błędy przypadkowe obu wzorców oraz błąd systematyczny odtworzenia i błąd systematyczny przekazania wielkości jednostki mocy średniej przez wzorzec pierwotny.

W sensie fizycznym błąd ten przedstawia błąd pomiaru mocy średniej (energii) i obok błędu odtworzenia i przekazania wielkości jednostki powinien zawierać błędy wszystkich pomiarów wykonywanych w procesie odtworzenia wartości jednostki danej wielkości optycznej.

Zatem błąd WP, przedstawiony w postaci odchylenia średniego kwadratowego $S_{\Sigma P}$ wyniku pomiaru mocy średniej podczas porównania z wzorcem pierwotnym, jest opisany następująco²⁷:

$$S_{\Sigma P} = \sqrt{S_W^2 + S_{\epsilon\Sigma}^2 + \frac{1}{3}\Theta_W^2 + S_{ov}^2 + \frac{1}{3}\Theta_{Pel}^2 + S_{PP}^2 + S_{OP}^2} \quad (4.7)$$

Ponieważ odtworzenia wielkości jednostki energii również dokonuje się na wzorcu podstawowym, zatem błąd odtworzenia wielkości jednostki energii $S_{\Sigma Q}$ jest określony wzorem:

$$S_{\Sigma Q} = \sqrt{S_W^2 + S_{\epsilon\Sigma}^2 + \frac{1}{3}\Theta_W^2 + S_{ov}^2 + \frac{1}{3}\Theta_{Pel}^2 + S_{PP}^2 + S_{oQ}^2 + S_z^2} \quad (4.8)$$

Błąd przekazania wielkości jednostki mocy średniej i energii opisują wyrażenia:

$$S_{\epsilon\Sigma P} = \sqrt{S_{V_1}^2 + S_{V_1'}^2 + S_{V_{-1}}^2 + S_{V_{-1}'}^2 + S_{\tau}^2 + \frac{1}{3}\left[\Theta_{xy}^2 + (\Theta_{\beta} + \Theta_P)^2\right]} \quad (4.9)$$

$$S_{\epsilon\Sigma Q} = \sqrt{S_{V_1}^2 + S_{V_1''}^2 + S_{V_{-1}}^2 + S_{V_{-1}''}^2 + S_Q^2 + \frac{1}{3}\left[\Theta_{xy}^2 + (\Theta_{\beta} + \Theta_P)^2\right]} \quad (4.10)$$

Błędy składowe oraz ich wartości przedstawiono w tabelach 4.1 i 4.2.

²⁷ S.G. Rabinowicz, *Pogresznosti izmierenij*, Energia 1978, s. 264.

Tabela 4.1

BŁĘDY ODTWORZENIA JEDNOSTKI MOCY I ENERGII

Rodzaj błędu	Oznaczenie	Wartość błędu %
Odchylenie średnie kwadratowe odtworzenia wielkości jednostki mocy średniej przez wzorzec pierwotny	S_w	0,03
Błąd systematyczny odtworzenia wielkości jednostki mocy średniej przez wzorzec pierwotny	Θ_w	0,04
Błąd przekazania wielkości jednostki przez wzorzec pierwotny wzorcowi podstawowemu	$S_{\epsilon\Sigma}$	0,1
Odchylenie średnie kwadratowe pomiaru stosunku sygnałów elektrycznych przy określaniu współczynnika ekwiwalentności oddziaływania na PPWP energii optycznej i ekwiwalentnej energii elektrycznej	S_{OV}	0,04
Błąd systematyczny pomiaru mocy elektrycznej dla WP	Θ_{PeI}	0,01
Odchylenie średnie kwadratowe PPWP	S_{PP}	0,06
Odchylenie średnie kwadratowe pomiaru sygnałów elektrycznych podczas odtwarzania wielkości jednostki mocy średniej (energii)	$S_{OP} (S_{OQ})$	0,059
Odchylenie średnie kwadratowe pomiaru czasu trwania impulsu promieniowania, formowanego przez zawór optyczny	S_Z	0,07

Tabela 4.2

BŁĘDY PRZEKAZANIA JEDNOSTKI MOCY I ENERGII

Rodzaj błędu	Oznaczenie	Wartość błędu %	
		$\lambda = 0,5 \mu\text{m}$	$\lambda = 10,6 \mu\text{m}$
Odchylenie średnie kwadratowe wyników pomiarów przyrządów pomiarowych otrzymywanych przy określeniu współczynnika dzielenia K_D przez dzielnik dyfrakcyjny	S_{V+1}	0,046	0,015
	$S_{V'+1}$	0,034	0,040
	S_{V-1}	0,050	0,014
	$S_{V'-1}$	0,025	0,049
Błąd systematyczny uwarunkowany zależnością K_D od miejsca padania wiązki promieniowania na powierzchnię dzielnika dyfrakcyjnego	Θ_{xy}	0,005	0,006
Błąd systematyczny uwarunkowany zależnością K_D od polaryzacji i charakterystyki kierunkowości promieniowania laserowego	$\Theta_\beta + \Theta_P$	0,071	0,084
Odchylenie średnie kwadratowe niestabilności mocy wyjściowej promieniowania laserowego podczas przekazywania wielkości jednostki mocy (energii)	$S_P (S_Q)$	0,056 (0,12)	0,056 (0,11)

Wartości błędów $S_{\Sigma P}$ i $S_{\Sigma Q}$ przy uwzględnieniu danych przedstawionych w tabeli 4.3 są równe 0,14% i 0,16%. Określenie tych wartości przeprowadzono dla poziomu mocy średniej 0,3 W i energii 0,3 J.

Błąd przekazania wielkości jednostki mocy średniej i energii jest określony błędem dzielnika dyfrakcyjnego i składową uzależnioną od niestabilności mocy

wyjściowej promieniowania laserowego²⁸. Z danych przedstawionych w tabeli 4.3 wynika, że błąd przekazania wielkości mocy średniej S_{eSP} wynosi 0,1% dla $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$ i $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$, zaś błąd przekazania wielkości jednostki energii S_{eSQ} 0,15% i 0,14% dla długości fal 0,5 i 10,6 μm .

Charakterystyki atestacji metrologicznej wzorca pierwotnego przedstawiono w tabeli 4.3.

Tabela 4.3

CHARAKTERYSTYKI METROLOGICZNE WZORCA JEDNOSTKI MOCY ŚREDNIEJ
I ENERGII PROMIENIOWANIA LASEROWEGO

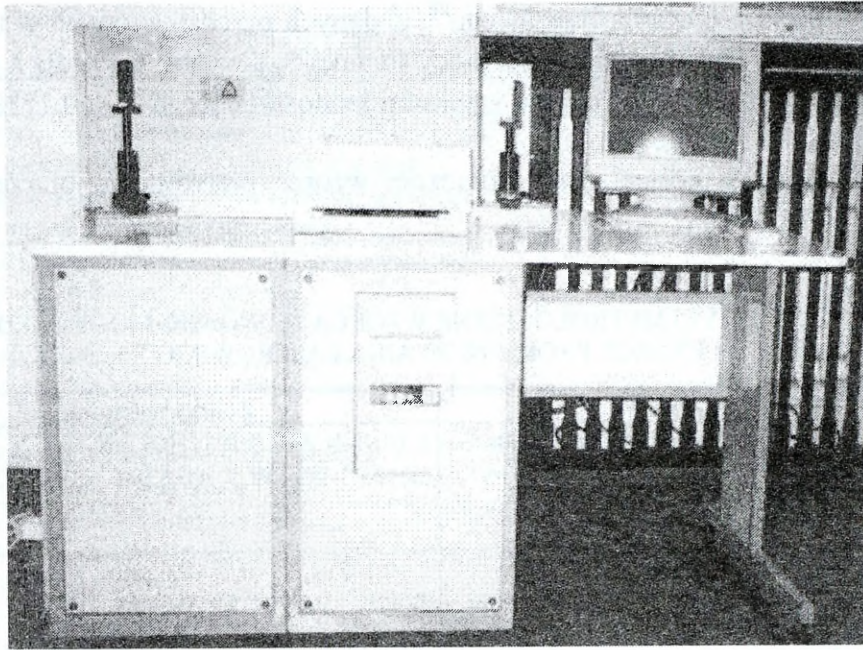
Rodzaj parametru	Zakres wartości
Wielkość jednostki mocy promieniowania laserowego chroniona i przekazywana kontrolowanemu przyrządowi pomiarowemu jest zawarta w zakresach	I. (0,1–2) W, $\lambda = 0,5; 10,6 \mu\text{m}$ II. (10^{-2} – 10^{-3}) W, $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$
Wielkość jednostki energii impulsowego promieniowania chroniona i przekazywana kontrolowanemu urządzeniu pomiarowemu jest zawarta w zakresach	I. (0,1–2) J, $\lambda = 0,5; 10,6 \mu\text{m}$ II. (10^{-2} – 10^{-3}) W, $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$
Długości fal promieniowania laserowego	0,5 μm i 10,6 μm
Błąd podstawowy (odchylenie średnie kwadratowe) odtworzenia jednostki mocy S_{eP} i energii S_{eQ} nie przekracza	0,15· 10^{-2} i 0,20· 10^{-2} dla zakresu I 0,5· 10^{-2} i 0,5· 10^{-2} dla zakresu II
Błąd przekazania S_{eP} jednostki mocy i jednostki energii S_{eQ} kontrolowanemu przyrządowi pomiarowemu nie przekracza	0,15· 10^{-2} i 0,20· 10^{-2} dla zakresu I 0,5· 10^{-2} i 0,5· 10^{-2} dla zakresu II

4.2. Wzorzec jednostki energii impulsowego promieniowania laserowego

4.2.1. Schemat wzorca, wybór sposobu odtworzenia wielkości jednostki energii

W akredytowanym Laboratorium Optoelektroniki WAT opracowano i eksploatowano przedstawiony poniżej wzorzec jednostki energii impulsowego promieniowania laserowego (rysunek 4.3). Składa się on z komputera sterującego pracą zestawu, szafki z zasilaczem, blokiem sterującym i pomiarowym oraz bloku optycznego. Komputer umożliwia sterowanie pracą wzorca za pośrednictwem bloku sterowania, analizę i zobrazowanie wyników uzyskanych w trakcie wzorcowania oraz ich archiwizację. Blok optyczny generuje światło laserowe wzorca, które wraz z wiązką przyrządu badanego kieruje do układu pomiarowego. Ten ostatni umożliwia obróbkę światła promieniowania laserowego pochodzącego z obu źródeł i ich analizę.

²⁸ J. Owsik, *Błąd współczynnika dzielenia dyfrakcyjnego przetwornika promieniowania laserowego*, Metrology and Measuring Systems 1995, t. II, z. 3, s. 227–234.



Fot. M.M.

Rys. 4.3. Wzorzec jednostki energii impulsowego promieniowania laserowego

Wzorzec jest przeznaczony do ochrony jednostki energii promieniowania impulsowego i przekazania jej wielkości przetwornikom pomiarowym, pracującym na długościach fal 0,53 i 1,06 μm w zakresie energii 10^{-6} – 10^{-1} J dla czasów trwania impulsów 10^{-9} – 10^{-3} s. Schemat wzorca przedstawiono na rysunku 4.4.

Ze schematu wynika, że podstawowymi blokami są: aparatura przekazania wielkości jednostki energii, aparatura pomiaru energii oraz aparatura sterowania wzorcem. Podział energii promieniowania laserowego za pomocą siatek dyfrakcyjnych umożliwia jednoczesną jej rejestrację przez przetwornik pomiarowy wzorca (PPW) i przetwornik kontrolowanego przyrządu pomiarowego. Wartość energii promieniowania laserowego mierzona za pomocą PPW określana jest przez wyrażenie:

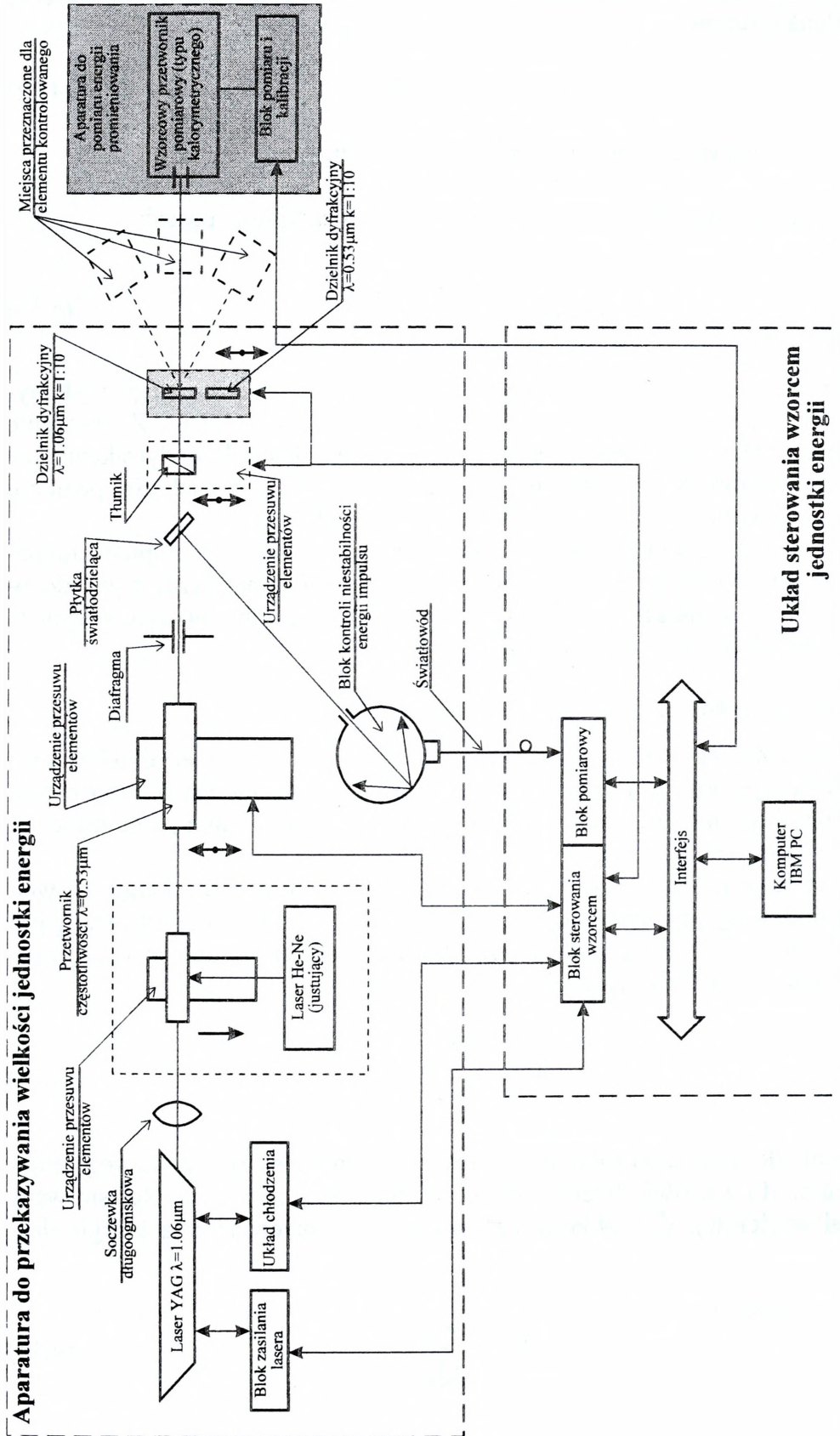
$$Q_{\text{opt}} = \frac{V_{\text{opt}}}{K_E A_{\text{el}}} \quad (4.11)$$

gdzie:

V_{opt} – sygnał na wyjściu PPW,

K_E – współczynnik ekwiwalentności PPW (współczynnik ekwiwalentności K_E przypisany jest PPW w wyniku przekazania wielkości jednostki energii od WP),

A_{el} – współczynnik przetwarzania ekwiwalentnej energii elektrycznej.



Rys. 4.4. Schemat wzorca jednostki energii impulsowego promieniowania laserowego

Energia optyczna na wejściu kontrolowanego przetwornika pomiarowego (PP) jest określana wzorem:

$$Q_{WEPP} = Q_{opt} K_D \quad (4.12)$$

gdzie K_D – współczynnik dzielenia siatki dyfrakcyjnej.

Uwzględniając wyrażenie (4.11) zależność (4.12) przyjmuje postać:

$$Q_{WEPP} = K_D \frac{V_{opt}}{K_E A_{el}} \quad (4.13)$$

W układzie tym zalecane jest umieszczenie PPW w kanale zerowego rzędu dyfrakcji, co znacznie zawęży zakres energii mierzonej przez PPW. Zwiększenie zakresu jest możliwe w wyniku zastosowania zestawu dzielników dyfrakcyjnych. Są one wprowadzone w tor optyczny wzorca w zależności od wielkości poziomu energii, która powinna być podana do kontrolowanego PP.

Opisany układ wzorca jest łatwy do automatyzacji, przy czym stopień automatyzacji może być większy od 80%. Praktyczna realizacja układu wzorca jest złożona, wymaga bardzo dokładnej atestacji (błąd $< 0,5-1\%$) dzielników dyfrakcyjnych, dla współczynników dzielenia K_D rzędu $10^{-2}-10^{-4}$.

4.2.2. Zasada działania wzorca jednostki energii

Wzorzec jednostki energii otrzymuje wielkość jednostki energii od wzorca podstawowego jednostki mocy średniej i energii promieniowania laserowego. Przeznaczony jest on do ochrony wielkości jednostki i przekazania jej kontrolowanym przyrządom pomiarowym.

W procesie przekazania wielkości jednostki energii wzorcowi energii, na wejście PPW podawany jest impuls optyczny o znanej energii Q_{opt} i rejestrowany jest sygnał wyjściowy V_{opt} . Na podstawie tych dwóch wartości oblicza się współczynnik przetwarzania energii optycznej:

$$A_{opt} = \frac{V_{opt}}{Q_{opt}} \quad (4.14)$$

Następnie do uzwojenia PPW podawany jest sygnał elektryczny, którego energia Q_{el} jest co do wartości zbliżona do energii impulsu optycznego. Rejestrowany jest sygnał wyjściowy V_{el} i oblicza się współczynnik przetwarzania energii elektrycznej:

$$A_{el} = \frac{V_{el}}{Q_{el}} \quad (4.15)$$

Obliczany jest następnie współczynnik ekwiwalentności K_E oddziaływania na element odbiorczy PPW energii optycznej i ekwiwalentnej energii elektrycznej:

$$K_E = \frac{A_{opt}}{A_{el}} \quad (4.16)$$

Wartość współczynnika K_E rejestruje się jako wynik przekazania wielkości jednostki energii od wzorca państwowego do wzorca jednostki energii.

W procesie przekazania wielkości jednostki energii przez wzorzec kontrolowanym PP w pierwszym etapie na PPW podawana jest moc elektryczna i na podstawie pomierzonych wartości sygnału wyjściowego V_{el} , określany jest współczynnik przetwarzania:

$$A_{el} = \frac{V_{el}}{U_{el} I_{el} \tau_{el}} \quad (4.17)$$

W drugim etapie energia optyczna jednocześnie podawana jest na PPW i kontrolowany PP. Energię impulsu promieniowania laserowego na wejściu kontrolowanego PP otrzymujemy zgodnie z wyrażeniem 4.12 na podstawie:

- sygnału wyjściowego V_{opt} ,
- współczynnika dzielenia siatki dyfrakcyjnej K_D ,
- współczynnika ekwiwalentności K_E (otrzymanego przez porównanie),
- współczynnika przetwarzania A_{el} (otrzymany na etapie pierwszym).

Jak widać z rysunku 4.2 i wyrażenia 4.11 najważniejszą rolę metrologiczną podczas przekazywania wielkości jednostki spełnia dzielnik na siatce dyfrakcyjnej.

4.2.3. Badania metrologiczne wzorca wtórnego

Wielkość jednostki energii impulsowego promieniowania laserowego otrzymuje wzorzec wtórny od wzorca podstawowego metodą porównania.

Błędy odtworzenia $S_{\Sigma WW}$ i przekazania $S_{\epsilon \Sigma WW}$ wielkości jednostki energii przez wzorzec wtórny opisują formuły:

$$S_{\Sigma WW} = \sqrt{S_{\Sigma Q}^2 + S_{\epsilon \Sigma Q}^2 + S_{OV}^2 + S_{PP}^2 + S_{OQ}^2 + \frac{1}{3} \Theta_{OQel}} \quad (4.18)$$

$$S_{\epsilon \Sigma WW} = \sqrt{S_{V_0}^2 + S_{V_{00}}^2 + S_{V_{+1}}^2 + S_{V_{0+1}}^2 + S_Q^2 + \frac{1}{3} (\Theta_{xy}^2 + \Theta_P^2 + \Theta_\beta^2)} \quad (4.19)$$

W tabelach 4.4 i 4.5 przedstawiono błędy składowe oraz ich wartości.

BŁĘDY ODTWORZENIA JEDNOSTKI ENERGII

Tabela 4.4

Rodzaj błędu	Oznaczenie	Wartość %
Błąd odtworzenia wielkości jednostki energii przez wzorzec podstawowy	$S_{\Sigma Q}$	0,12
Błąd przekazania wielkości jednostki od wzorca podstawowego wzorcowi wtórnemu	$S_{e\Sigma Q}$	0,15
Odchylenie średnie kwadratowe pomiaru stosunku sygnałów elektrycznych przy określeniu współczynnika ekwiwalentności K_E dla wzorca wtórnego	S_{OV}	0,05
Odchylenie średnie kwadratowe PP WW	S_{PP}	0,9
Błąd systematyczny pomiaru energii elektrycznej dla wzorca wtórnego	Θ_{OQel}	0,01
Odchylenie średnie kwadratowe pomiaru sygnałów elektrycznych podczas odtwarzania wielkości jednostki energii	S_{OQ}	0,06

BŁĘDY PRZEKAZANIA JEDNOSTKI ENERGII KONTROLOWANYM PRZYRZĄDOM POMIAROWYM

Tabela 4.5

Rodzaj błędu	Oznaczenie	Wartość %
Odchylenie średnie kwadratowe wskazań urządzeń pomiarowych wykorzystywanych do określania K_D	S_{V_0}	0,046
	$S_{V'_0}$	0,034
	$S_{V_{+1}}$	0,050
	$S_{V'_{+1}}$	0,025
Błąd systematyczny uwarunkowany zależnością K_D od miejsca padania wiązki promieniowania na powierzchnię roboczą dzielnika dyfrakcyjnego	Θ_{xy}	0,005
Błąd systematyczny uwarunkowany zależnością K_D od polaryzacji promieniowania laserowego	Θ_P	0,300
Błąd systematyczny uwarunkowany zależnością K_D od charakterystyki kierunkowości promieniowania laserowego	Θ_β	0,078
Odchylenie średnie kwadratowe uwarunkowane niestabilnością energii promieniowania laserowego	S_Q	0,080

Z danych wynika, że błędy odtworzenia i przekazania wielkości jednostki energii przez wzorzec wtórny wynoszą odpowiednio 0,92 i 0,21%.

Charakterystyki atestacji metrologicznej wzorca wtórnego przedstawiono w tabeli 4.6.

PODSTAWOWE CHARAKTERYSTYKI METROLOGICZNE WZORCA WTÓRNEGO

Rodzaj parametru	Zakres wartości
Wielkość jednostki energii promieniowania laserowego chroniona i przekazywana kontrolowanemu przyrządowi pomiarowemu	10^{-3} – $2 \cdot 10^{-2}$ J
Długości fali promieniowania laserowego	0,53 μm i 1,06 μm
Czas trwania impulsu laserowego	$\tau \geq 5 \cdot 10^{-9}$ s
Odchylenie średnie kwadratowe odtworzenia jednostki energii $S_{\Sigma WW}$	$\leq 1 \cdot 10^{-2}$
Błąd przekazania jednostki energii $S_{e\Sigma WW}$	$\leq 1 \cdot 10^{-2}$

4.3. Wzorzec wata dla dużych poziomów mocy promieniowania laserowego

4.3.1. Przesłanki opracowania wzorca

Dużym zainteresowaniem na świecie cieszą się lasery technologiczne, tj. lasery CO₂ z długością fali $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ i mocą do 5 kW²⁹. Tendencje te występują również w Polsce. O jakości procesu technologicznego decyduje precyzja dozowania promieniowania laserowego na obrabiany przedmiot (detal). Precyzja ta wynika z klasy stosowanych przyrządów pomiarowych oraz aktualności świadectw ich kontroli metrologicznej (do czego niezbędne są właściwe wzorce). Istniejąca w Polsce baza metrologiczna w zakresie techniki laserowej nie zaspokaja obecnie potrzeb w zakresie dużych mocy i energii promieniowania. Przedstawiony na rysunku 4.3 wzorzec jednostki mocy promieniowania laserowego byłby przeznaczony do ochrony i przekazania wielkości jednostki przyrządom pomiarowym pracującym na długości fali $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ i poziomie mocy około 1 kW. Prezentowane rozwiązanie stanowiłoby kolejne ogniwo łańcucha pomiarowego dla już istniejącej bazy zabezpieczenia metrologicznego techniki laserowej³⁰. Wzorzec otrzymywałby wielkości jednostki od wzorca jednostki mocy średniej i energii promieniowania laserowego. Takie rozwiązanie umożliwiłoby zaspokojenie potrzeb krajowej bazy metrologicznej w zakresie laserów technologicznych.

Ochrona wielkości jednostki wata z dużą dokładnością jest możliwa z wykorzystaniem przetwornika pomiarowego typu kalorymetrycznego. Odbiornik przetwornika pracujący na zasadzie porównania mocy optycznej z mocą elektryczną oraz elektroniczna aparatura pomiarowa umożliwiają ochronę i odtwarzanie jednostki mocy. Przekazanie wielkości jednostki mocy jest możliwe przy wykorzystaniu laserów. Wiązka laserowa wprowadzona jest zarówno do przetwornika pomia-

²⁹ S.G. Anderson, *Review and forecast of laser markets 1997*, Laser Focus World 1997, Vol. 33, No 1, s. 72–80; G. Forrest, *Applications for industrial laser continue to expand*, Laser Focus World 1997, Vol. 33, No 6, s. 105–110; S.A. Weiss, *High-Power Lasers: Evolution Weeds out the Weak*, Photonics Spectra, June 1998, s. 110–115.

³⁰ J. Owsik, W. Skrzeczanowski, A.A. Liberman, A.F. Kotyuk, *Standard of watt for high power levels of laser radiation*, Proc. SPIE 1999, Vol. 4018, s. 54–60.

rowego wzorca (PPW), jak i przetwornika pomiarowego (PP), któremu przekazywana jest wielkość jednostki mocy. Wielkość jednostki mocy przekazywana jest metodą bezpośrednią za pomocą lasera ciągłego działania.

W opracowanym wzorcu PPW i PP kontrolowanego przyrządu pomiarowego przyjmują wiązki tego samego lasera, padające na ich wejście z dzielnika optycznego. Optymalnym wariantem jest tutaj przypadek, kiedy wyjściowa wiązka promieniowania laserowego dzieli się w stosunku 1:1000. Niezbędny w tym przypadku jest dzielnik optyczny atestowany metrologicznie. Dla rozpatrywanego wzorca takim dzielnikiem jest odbiciowa siatka dyfrakcyjna³¹.

Zaletą takiego rozwiązania jest jednoczesne padanie promieniowania na oba przetworniki. W wyniku tego praktycznie nie ma potrzeby stabilizacji parametrów lasera i odpowiednio skraca się czas niezbędny do przekazania wielkości jednostki mocy.

4.3.2. Schemat wzorca

Schemat wzorca przedstawiono na rysunku 4.5. Ze schematu wynika, że blokami podstawowymi są:

1. Aparatura do pomiaru mocy, przeznaczona do ochrony i przekazania jednostki mocy. W jej skład wchodzi:

- przetwornik pomiarowy wzorca;
- blok kalibracji mocy elektrycznej, składający się ze stabilizowanego źródła mocy elektrycznej, zaworu elektronicznego wycinającego impuls elektryczny o znanym czasie trwania, woltomierza cyfrowego, przeznaczonego do pomiaru napięcia i prądu na cewce uzwojenia przetwornika pomiarowego w czasie oddziaływania impulsu elektrycznego. Woltomierz cyfrowy mierzy jednocześnie sygnał wyjściowy z przetwornika pomiarowego.

2. Aparatura przekazania wielkości jednostki energii kontrolowanym przyrządem pomiarowym, w skład której wchodzi:

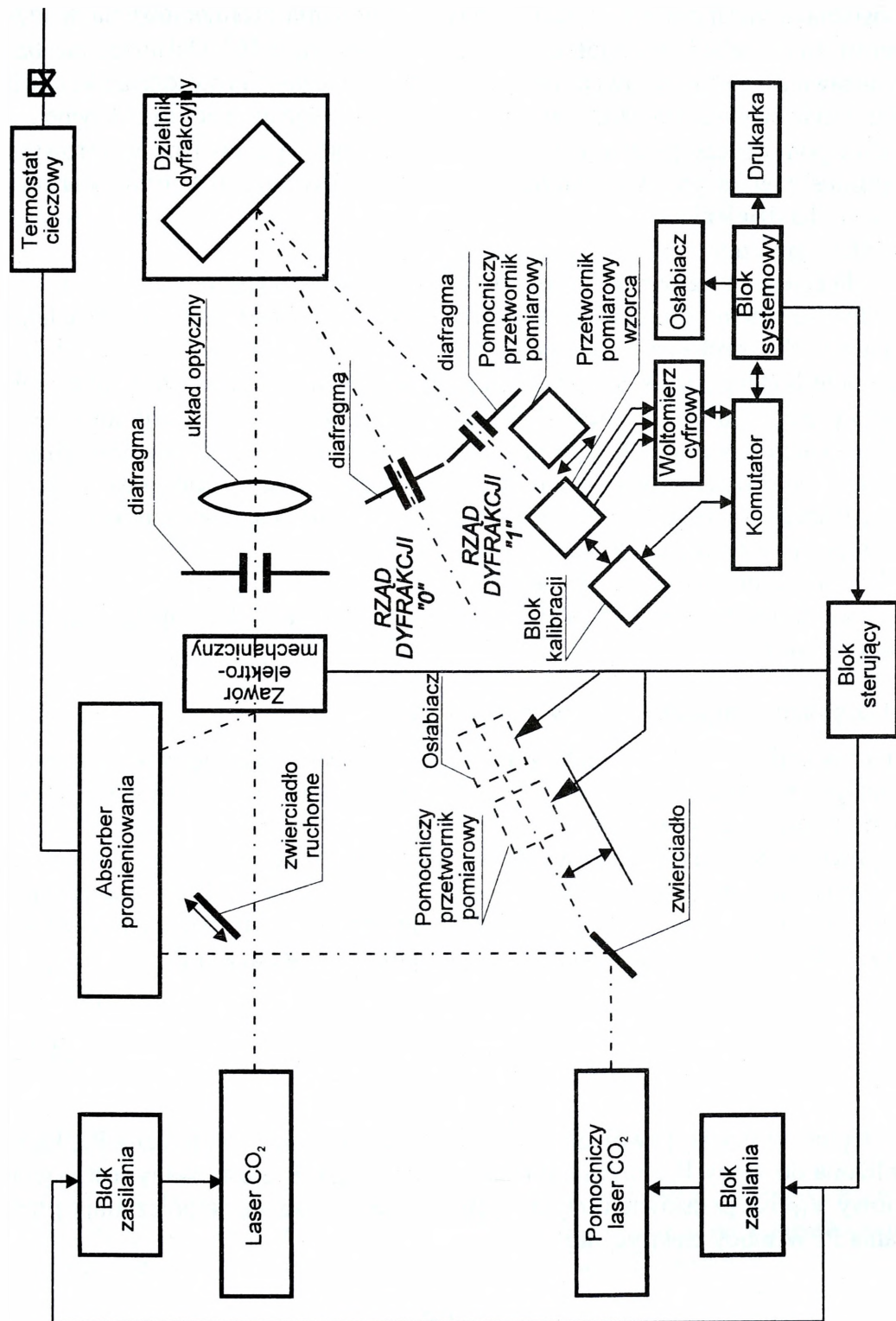
- laser pracujący z falą o długości $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$;
- zawór elektromechaniczny, wycinający z wiązki promieniowania laserowego impuls, którego czas trwania mierzony jest z dużą dokładnością;
- dzielnik na siatce dyfrakcyjnej ze znanym współczynnikiem dzielenia mocy ($K_D = 10^3$) w zerowym i plus (minus) pierwszym rzędzie dyfrakcji. Przy tym w plus (minus) pierwszym rzędzie dyfrakcji wstawiony jest przetwornik pomiarowy wzorca, a rząd zerowy jest przeznaczony do ustawiania kontrolowanego przyrządu pomiarowego;

- układ optyczny.

3. System termostabilizacji elementów wchodzących w skład wzorca.

4. System kontroli współczynnika dzielenia K_D dzielnika na siatce dyfrakcyjnej, w skład którego wchodzi:

³¹ J. Owsik; *Diffraction splitter of laser radiation with high splitting coefficient*, J.Tech.Phys. 1995, Vol. 36, No 2, s. 149–152; idem, *Dzielnik dyfrakcyjny promieniowania laserowego z dużym współczynnikiem dzielenia*, Metrology and Measuring Systems 1995, t. II, z. 3, s. 250–252.



Rys. 4.5. Schemat wzorca wtórnego dużych poziomów mocy promieniowania laserowego

- laser o tej samej długości fali co laser podstawowy, mający moc wyjściową o rząd niższą od lasera podstawowego;
- osłabiacz mechaniczny, przeznaczony do tłumienia promieniowania w rzędzie zerowym dyfrakcji ze współczynnikiem tłumienia $K_0 \approx 10^3$. Osłabiacz mechaniczny ustawiany jest w zerowym rzędzie dyfrakcji w czasie prowadzenia kontroli wartości współczynnika dzielenia przetwornika pomiarowego na siatce dyfrakcyjnej;
- dwa pomocnicze przetworniki pomiarowe, które są ustawiane w zerowym i plus (minus) pierwszym rzędzie dyfrakcji w czasie prowadzenia kontroli wartości współczynnika dzielenia;
- układ optyczny.

5. Układ sterowania wzorcem i rejestracji parametrów wyjściowych.

Zgodnie ze schematem proces przekazania wielkości jednostki przez wzorzec kontrolowanemu PP przebiega następująco. Promieniowanie laserowe o długości fali $10,6 \mu\text{m}$ przechodzi przez układ optyczny i pada na dzielnik mocy na siatce dyfrakcyjnej. Dyfrakujące w „0” i „ ± 1 ” rzędy dyfrakcji wiązki są kierowane w wejściowe apertury PPW i kontrolowanego PP. Sygnały wyjściowe z przetworników są wprowadzane do aparatury sterowania wzorca, która umożliwi kontrolę procesu odtwarzania i przekazania wielkości jednostki a także rejestrację i obróbkę informacji pomiarowej.

Wzorzec ma dwa rodzaje pracy:

1. Kalibracja przetwornika pomiarowego wzorca.
2. Przekazanie wielkości jednostki mocy promieniowania laserowego przyrządom pomiarowym.

4.3.3. Kalibracja przetwornika pomiarowego wzorca

Podczas kalibracji przetwornik pomiarowy wzorca ustawia się w miejsce kontrolowanego przyrządu pomiarowego we wzorcu jednostki mocy średniej i energii promieniowania laserowego.

W procesie tym na wejście elementu odbiorczego przetwornika pomiarowego wzorca podawane jest promieniowanie laserowe o znanej mocy P_{opt} i rejestrowany jest jego sygnał wyjściowy V_{opt} . Na podstawie otrzymanych danych oblicza się współczynnik przetwarzania przetwornika pomiarowego wzorca (PPW):

$$A_{\text{opt}} = \frac{V_{\text{opt}}}{P_{\text{opt}}} \quad (4.20)$$

Następnie na cewkę uzwojenia PPW podawana jest moc elektryczna P_{el} , która jest zbliżona do mocy P_{opt} promieniowania laserowego, i rejestrowany jest sygnał wyjściowy V_{el} . Na podstawie otrzymanych danych oblicza się współczynnik przetwarzania PPW mocy elektrycznej:

$$A_{\text{el}} = \frac{V_{\text{el}}}{P_{\text{el}}} \quad (4.21)$$

Oblicza się także współczynnik ekwiwalentności K_E oddziaływania na element odbiorczy PPW mocy promieniowania laserowego i ekwiwalentnej mocy impulsu elektrycznego:

$$K_E = \frac{A_{opt}}{A_{el}} \quad (4.22)$$

Wartość współczynnika K_E stanowi wynik certyfikacji PPW i zachowywana jest do kolejnej certyfikacji wzorca promieniowania laserowego (dużych poziomów mocy). Stałość K_E zapewnia się przez odpowiednią konstrukcję PPW i istnieje możliwość okresowej kontroli wartości tego współczynnika za pomocą bloku kalibracji elektrycznej.

4.3.4. Wielkość jednostki mocy

Do przekazania przyrządom pomiarowym wielkości jednostki mocy promieniowania laserowego (dla dużych poziomów) stosuje się aparaturę przekazania. Jej szczególną własnością jest to, że zawiera atestowany metrologicznie dzielnik na siatce dyfrakcyjnej, za pomocą którego promieniowanie laserowe podawane jest na wejście PPW i PP kontrolowanego przyrządu pomiarowego.

W początkowej fazie przekazania wielkości jednostki justowany jest tor optyczny wzorca, tak aby wiązka promieniowania laserowego padała w środek elementu odbiorczego PPW i w środek elementu odbiorczego PP kontrolowanego przyrządu pomiarowego. Następnie podawana jest moc promieniowania laserowego i rejestruje się sygnały wyjściowe PPW V_{opt} i PP V_1 . Na podstawie otrzymanych wartości określa się moc P_{opt} impulsowego promieniowania laserowego na wejściu PPW:

$$P_{opt} = \frac{V_{opt}}{K_E \cdot A_{el}} \quad (4.23)$$

oraz określa się moc P_{WEPP} promieniowania laserowego na wejściu kontrolowanego PP:

$$P_{WEPP} = K_D \cdot P_{opt} \quad (4.24)$$

gdzie: K_D – współczynnik dzielenia siatki dyfrakcyjnej.

W wyniku porównania sygnału wyjściowego V_1 kontrolowanego PP i wartości mocy P_{WEPP} promieniowania laserowego na jego wejściu określa się charakterystyki metrologiczne PP kontrolowanego przyrządu pomiarowego.

4.3.5. Dzielnik promieniowania na siatce dyfrakcyjnej

Dzielnik promieniowania to metalowa odbiciowa siatka dyfrakcyjna. Zasada pracy dzielnika jest następująca. Promieniowanie laserowe pada na powierzchnię roboczą dzielnika, który jest ustawiony pod kątem $\varphi < 5^\circ$ do osi promieniowania. Promieniowanie odbija się zwierciadlanie od jego powierzchni pod kątem φ i jednocześnie ulega dyfrakcji pod kątem φ_n . Kąty φ_n opisywane są formułą:

$$\sin \varphi_n - \sin \varphi = \frac{n \cdot \lambda}{d}, \quad (4.25)$$

gdzie:

- n – rząd dyfrakcji,
- λ – długość fali promieniowania,
- d – okres siatki.

Współczynnik dzielenia K_D między zerowym rzędem dyfrakcji i plus (minus) pierwszym obliczany jest ze wzoru:

$$K_D = \left[\frac{\pi}{2 \cdot \sin(\pi \cdot \beta) \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot h}{\lambda}\right)} \right] \quad (4.26)$$

gdzie:

- h – głębokość nacięcia,
- β – współczynnik wypełnienia siatki (stosunek okresu powtarzania do szerokości nacięcia).

Aby otrzymać wartość $K_D \approx 10^3$, a także zmniejszenie wpływu polaryzacji na K_D , parametry przetwornika powinny być następujące:

$$d \approx 200 \mu\text{m}; \beta = 3; h = 0,1 \mu\text{m}.$$

Ponieważ technologia wykonania nie jest w stanie zapewnić zakładanych parametrów dzielnika, zatem potrzebna jest jego atestacja. W składzie wzorca znajduje się aparatura do kontroli okresowej współczynnika K_D .

Podczas kontroli współczynnika dzielenia K_D w tor wzorca wprowadzane są dwa pomocnicze przetworniki pomiarowe, osłabiacz i zwierciadło ruchome (rysunek 4.3). W tym przypadku promieniowanie pomocniczego lasera CO_2 ulega dyfrakcji na dzielniku promieniowania. Promieniowanie rzędu zerowego przez osłabiacz pada na pomocniczy przetwornik pomiarowy, a promieniowanie plus (minus) rzędu pierwszego pada bezpośrednio na analogiczny przetwornik. Przy tym rejestrowane są sygnały wyjściowe V_{W1} i V_{W2} , proporcjonalne do energii rzędu zerowego i plus (minus) pierwszego. Następnie przetworniki zamienia się miejscami,

ponownie podaje impuls optyczny lasera pomocniczego i rejestruje sygnały wyjściowe V'_{w1} i V'_{w2} . Zatem współczynnik dzielenia określa wzór:

$$K_D = K_0 \sqrt{\frac{V_{w1}}{V_{w2}} \cdot \frac{V'_{w2}}{V'_{w1}}} \quad (4.27)$$

gdzie K_0 – współczynnik tłumienia osłaniacza.

4.3.6. Charakterystyki metrologiczne wzorca

Podczas odtwarzania wielkości jednostki mocy głównym elementem wzorca decydującym o jego dokładności jest przetwornik pomiarowy wzorca, a podczas przekazywania wielkości jednostki mocy jest dzielnik dyfrakcyjny.

Błąd wzorca jest określany podczas porównywania go z wzorcem podstawowym. Na ten błąd składają się błędy przypadkowe obu wzorców oraz błąd systematyczny odtworzenia i błąd systematyczny przekazania wielkości jednostki mocy średniej przez wzorzec podstawowy.

W sensie fizycznym błąd ten przedstawia błąd pomiaru mocy średniej i obok błędu odtworzenia i przekazania wielkości jednostki powinien zawierać błędy wszystkich pomiarów wykonywanych w procesie odtworzenia wartości jednostki mocy danej wielkości optycznej.

Zatem błąd wzorca, przedstawiony w postaci odchylenia średniego kwadratowego $S_{\Sigma P}$ wyniku pomiaru mocy średniej podczas porównania z wzorcem podstawowym, jest opisany następująco:

$$S_{\Sigma P} = \sqrt{S_W^2 + S_\varepsilon^2 + \frac{1}{3}\Theta_W^2 + S_{ov}^2 + \frac{1}{3}\Theta_{Pel}^2 + S_{PP}^2 + S_{OP}^2} \quad (4.28)$$

Błąd przekazania wielkości jednostki mocy średniej opisuje wyrażenie:

$$S_{\varepsilon P} = \sqrt{S_{V_{w1}}^2 + S_{V'_{w1}}^2 + S_{V_{w2}}^2 + S_{V'_{w2}}^2 + S_P^2 + \frac{1}{3}\left[\Theta_{xy}^2 + \Theta_o^2 + (\Theta_\beta + \Theta_p)^2\right]} \quad (4.29)$$

Błędy składowe przedstawiono w tabelach 4.7 i 4.8.

Tabela 4.7

BŁĘDY ODTWORZENIA JEDNOSTKI MOCY

Rodzaj błędu	Oznaczenie
Odchylenie średnie kwadratowe odtworzenia wielkości jednostki mocy średniej przez wzorzec podstawowy	S_w
Błąd systematyczny odtworzenia wielkości jednostki mocy średniej przez wzorzec podstawowy	Θ_w
Błąd przekazania wielkości jednostki przez wzorzec podstawowy wzorcowi wtórnemu	S_e
Odchylenie średnie kwadratowe pomiaru stosunku sygnałów elektrycznych przy określaniu współczynnika ekwiwalentności oddziaływania PPW mocy optycznej i ekwiwalentnej mocy elektrycznej	S_{ov}
Błąd systematyczny pomiaru mocy elektrycznej dla wzorca wtórnego	Θ_{Pel}
Odchylenie średnie kwadratowe pomiaru mocy przez PPW	S_{pp}
Odchylenie średnie kwadratowe pomiaru sygnałów elektrycznych podczas odtwarzania wielkości mocy średniej	S_{op}

Tabela 4.8

BŁĘDY PRZEKAZANIA JEDNOSTKI MOCY

Rodzaj błędu	Oznaczenie
Odchylenie średnie kwadratowe wyników pomiarów przyrządów pomiarowych otrzymywanych przy określeniu współczynnika dzielenia K_D przez dzielnik dyfrakcyjny	S_{VW1} $S_{V'W1}$ S_{VW2} $S_{V'W2}$
Błąd systematyczny uwarunkowany zależnością K_D od miejsca padania wiązki promieniowania na powierzchnię dzielnika dyfrakcyjnego	Θ_{xy}
Błąd systematyczny uwarunkowany zależnością K_D od polaryzacji i charakterystyki kierunkowości promieniowania laserowego	$\Theta_{\beta+\Theta_p}$
Odchylenie średnie kwadratowe niestabilności mocy wyjściowej promieniowania laserowego podczas przekazywania wielkości jednostki mocy	S_p
Błąd systematyczny pomiaru tłumienia mocy, przy określaniu K_D	Θ_o

Ocena wartości błędów przeprowadzona na podstawie wzorów (4.28) i (4.29) dała następujące oceny:

$$S_{\Sigma P} \leq 1.0 \cdot 10^{-2}$$

$$S_{eP} \geq 1.0 \cdot 10^{-2}$$

WZORCE PRZENOŚNE MOCY I ENERGII PROMIENIOWANIA LASEROWEGO

5.1. Układy przenośnego wzorca mocy promieniowania laserowego

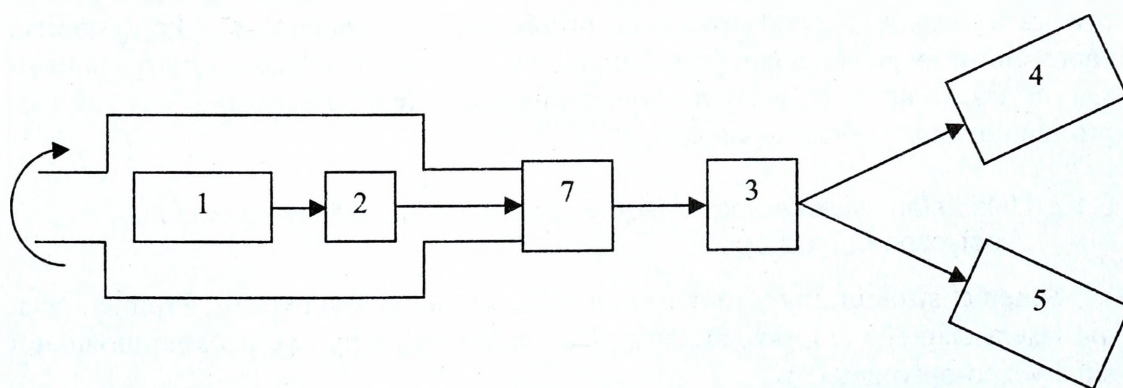
5.1.1. Układ pomiarowy stanowiska z zastosowaniem dzielnika promieniowania

Zastosowanie dzielnika promieniowania na stanowisku pomiarowym wzorcowym, w metodzie jednoczesnego (równoległego) podawania mocy średniej (energii) promieniowania laserowego na wzorcowy przetwornik pomiarowy i sprawdzany przyrząd pomiarowy, wymaga spełnienia przez dzielnik szeregu warunków, z których najważniejsze to:

- zapewnienie z dużą precyzją jednakowego poziomu mocy promieniowania laserowego (współczynnik podziału ($K_d = 1$) w obydwu kanałach;
- zapewnienie możliwie wysokiego poziomu mocy (energii) promieniowania laserowego w obydwu kanałach przy mocy wyjściowej źródła promieniowania $P_{opt} = 1-1,1$ W.

Wymagania te warunkują wybór dzielnika promieniowania i odpowiedniego schematu układu pomiarowego dla realizacji wzorca roboczego mocy promieniowania laserowego. W kolejnych podrozdziałach przedstawiono analizę różnych wariantów budowy stanowiska pomiarowego w zależności od stosowanego dzielnika promieniowania laserowego.

5.1.2. Układ stanowiska pomiarowego wzorca z zastosowaniem polaryzacyjnego dzielnika promieniowania laserowego



Rys. 5.1. Schemat stanowiska pomiarowego wzorca mocy promieniowania laserowego z zastosowaniem polaryzacyjnego dzielnika promieniowania laserowego

- 1 – źródło ciągłego promieniowania laserowego; 2 – polaryzator; 3 – pryzmat polaryzacyjny;
4 – wzorcowy przetwornik pomiarowy; 5 – kalibrowany przyrząd pomiarowy; 6 – stół obrotowy;
7 – przyrząd do pomiaru kątów.

Schemat strukturalny układu pomiarowego z zastosowaniem polaryzacyjnego dzielnika promieniowania laserowego przedstawiono na rysunku 5.1. Promieniowanie lasera ciągłego (1), po przejściu przez polaryzator (2), pada na pryzmat polaryzujący (3), na którym następuje podział wiązki na dwa kanały; w jednym z nich ustawiono wzorcowy przetwornik pomiarowy (4), w drugim natomiast sprawdzanym przyrząd pomiarowy (5). Laser (1) i polaryzator (2) umieszczone są na stole obrotowym (6), którego kąt obrotu mierzony jest za pomocą urządzenia do pomiaru kąta (7).

Podział mocy promieniowania laserowego padającej na polaryzujący pryzmat, pomiędzy dwa kanały określa się na podstawie prawa Malusa:

$$B_i = \tau \times \text{tg}^2 \alpha_i \quad (5.1)$$

gdzie:

τ – współczynnik charakteryzujący stosunek współczynników przejścia pryzmatu polaryzującego dla wiązki wtórnej – τ_w i zwykłej – τ_z ,

α_i – kąt w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku rozchodzenia się promieniowania laserowego padającego na polaryzujący pryzmat, pomiędzy osią polaryzacji pryzmy i wektorem polaryzacji padającego na pryzmat promieniowania laserowego.

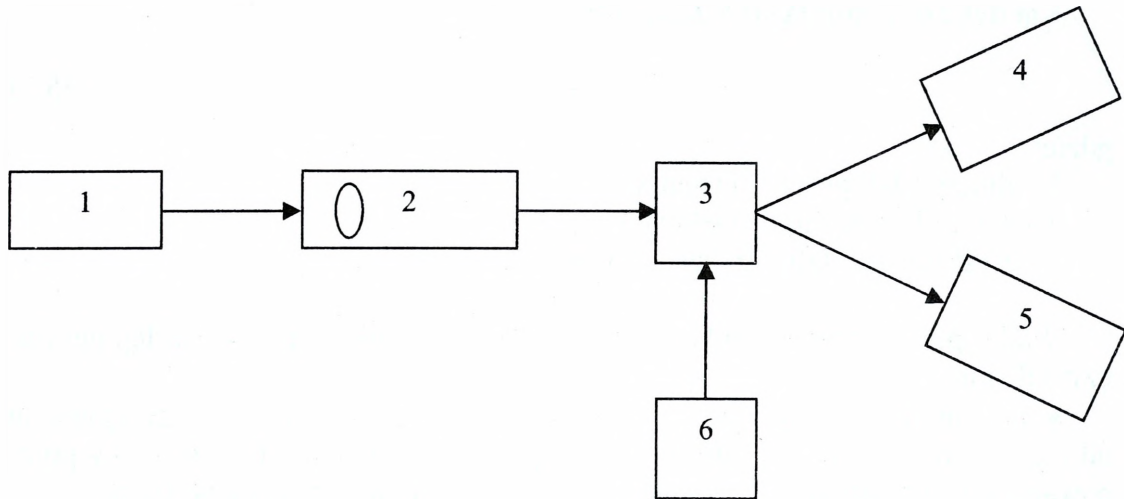
Podstawowym zadaniem przy justowania i kalibracji tak utworzonego toru pomiarowego jest osiągnięcie równości mocy pomiędzy kanałami po przejściu promieniowania laserowego przez pryzmat polaryzujący. W tym celu za pomocą stołu obrotowego dokonuje się obrotu wektora polaryzacji promieniowania laserowego padającego na pryzmat w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku rozchodzenia się promieniowania, do momentu, gdy moce wyjściowe obydwu wiązek z pryzmatu polaryzującego będą równe. To położenie odpowiada współczynnikowi $B_i = 1$. Spełnienie tego warunku kontrolowane jest za pomocą dwóch wzorcowych przyrządów pomiarowych, lub za pomocą urządzeń służących do porównywania intensywności dwóch wiązek światła.

Błąd wyznaczenia współczynnika podziału równego 1 w tym układzie pomiarowym wynosi 0,1%. Podstawowymi problemami związanymi z wykorzystaniem zaprezentowanego schematu pomiaru mocy są stosunkowo duże wymiary stanowiska, a także brak materiałów do wykonania odpowiednich kryształów w zakresie promieniowania podczerwonego.

5.1.3. Układ stanowiska pomiarowego wzorca z zastosowaniem modulatora akustyczno-optycznego

Schemat strukturalny stanowiska przedstawiono na rysunku 5.2. Promieniowanie lasera ciągłego (1), przechodząc przez układ optyczny (2), pada na modulator akustyczno-optyczny (3).

Na modulatorze (3) następuje podział promieniowania według poziomów dyfrakcji. W układzie wykorzystuje się plus i minus pierwsze rzędy dyfrakcji. W jednym z nich w płaszczyźnie ogniskowej układu optycznego ustawiony jest wzorcowy przetwornik mocy (4), a w drugim sprawdzany przyrząd pomiarowy (5). Modulator ma postać komórki akustooptycznej, do której podłączony jest generator napięcia (6).



Rys. 5.2. Schemat stanowiska pomiarowego wzorca mocy promieniowania laserowego z zastosowaniem modulatora akustyczno-optycznego

1 – źródło ciągłego promieniowania laserowego; 2 – układ optyczny; 3 – modulator akustyczno-optyczny; 4 – wzorcowy przetwornik pomiarowy; 5 – kalibrowany przyrząd pomiarowy; 6 – generator napięcia.

Promieniowanie lasera podlega dyfrakcji na fali ultradźwiękowej. Jeżeli kierunek rozchodzenia się fali ultradźwiękowej jest prostopadły do kierunku rozchodzenia się strumienia promieniowania laserowego, to na wyjściu modulatora pojawiają się dwie wiązki o jednakowej intensywności, która jest wyznaczana na podstawie wzoru:

$$\frac{I_{(+1)}}{I_{(0)}} = \gamma w^2 \frac{\sin^2 \frac{\pi L}{\Lambda} \sqrt{w^2 + \Delta\phi^2}}{w^2 + \Delta\phi^2} \quad (5.2)$$

gdzie:

$I_{(+1)}$, $I_{(0)}$ – intensywności strumienia dyfrakcyjnego i padającego,

$$\Delta\phi = \phi - \phi_B$$

- ϕ – kąt padania wiązki na modulator,
- ϕ_B – kąt bragowski,
- L – długość przetwornika modulatora,
- Λ – długość fali ultradźwiękowej,
- w – moc fali akustooptycznej,
- γ – współczynnik proporcjonalności.

Kąt dyfrakcji oblicza się z zależności:

$$\alpha = \lambda \nu f \quad (5.3)$$

gdzie:

- λ – długość fali promieniowania,
- ν – częstotliwość fali dźwiękowej,
- f – częstotliwość fali ultradźwiękowej w komórce.

Wady powyższego układu pomiarowego uwarunkowane są następującymi czynnikami:

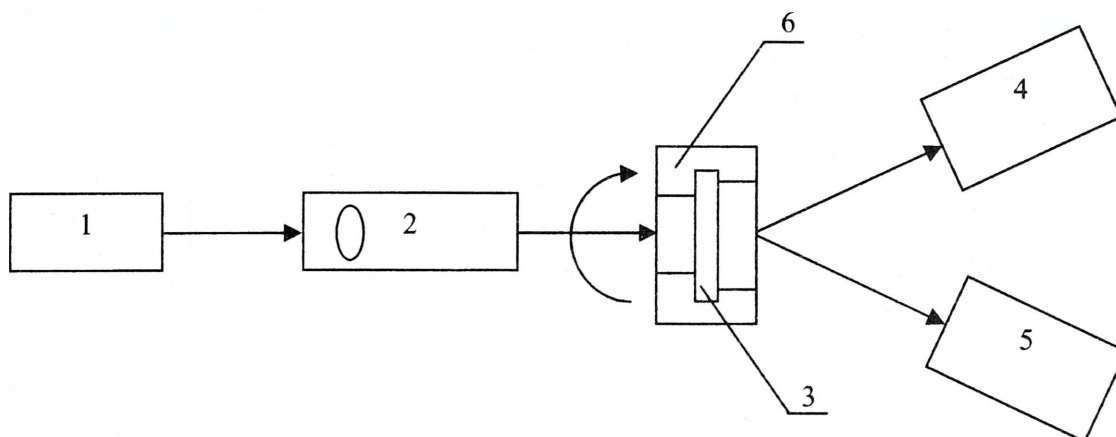
- moc promieniowania podlegającego dyfrakcji zależy wprost proporcjonalnie od mocy pompowania fali ultradźwiękowej. Dlatego też niestabilność mocy pompowania ma podstawowy wpływ na błąd określenia współczynnika podziału;
- częstotliwość promieniowania optycznego wiązki $I_{(-1)}$ jest równa $f_0 - f$, a wiązki $I_{(+1)}$ – $f_0 + f$, gdzie f_0 – częstotliwość promieniowania lasera. W czasie pomiaru częstotliwości promieniowania lasera f_0 w trakcie jego pracy (zmiana składu modu) intensywność jednej wiązki się zmniejsza, a drugiej zwiększa, co również prowadzi do pojawienia się składowej błędów uwarunkowanej niestabilnością współczynnika podziału.

Błąd określenia współczynnika podziału na modulatorze oceniany jest na 3%, co nie pozwala na zastosowanie tego schematu pomiaru do opracowania stanowiska wzorca mocy promieniowania laserowego.

5.1.4. Schemat stanowiska pomiarowego wzorca z zastosowaniem dzielnika promieniowania laserowego zbudowanego na bazie siatki dyfrakcyjnej

Schemat strukturalny stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 5.3. Promieniowanie lasera ciągłego (1) po przejściu przez układ optyczny (2) pada na siatkę dyfrakcyjną SD (3). W układzie pomiarowym wykorzystuje się plus i minus pierwsze rzędy dyfrakcji; w jednym z nich w płaszczyźnie ogniskowej układu optycznego ustawiony jest wzorcowy przetwornik mocy (4), w drugim – sprawdzany przyrząd pomiarowy (5). Siatka dyfrakcyjna (3) zamocowana jest w obejmie (6), pozwalającej na jej obrót o kąt 180° i ustawienie jej w dwóch przeciwstawnych położeniach.

W przedstawionym schemacie należy stosować siatkę dyfrakcyjną o symetrycznym przekroju linii siatki. Wówczas, przy normalnym padaniu promieniowania na powierzchnię siatki dyfrakcyjnej, zgodnie z teorią dyfrakcji, moc podlegająca dyfrakcji w symetrycznych rzędach dyfrakcji jest jednakowa i w rezultacie współczynnik podziału w tym układzie pomiarowym jest równy jedności.



Rys. 5.3. Schemat stanowiska pomiarowego wzorca mocy promieniowania laserowego z zastosowaniem dzielnika promieniowania laserowego zbudowanego na bazie siatki dyfrakcyjnej

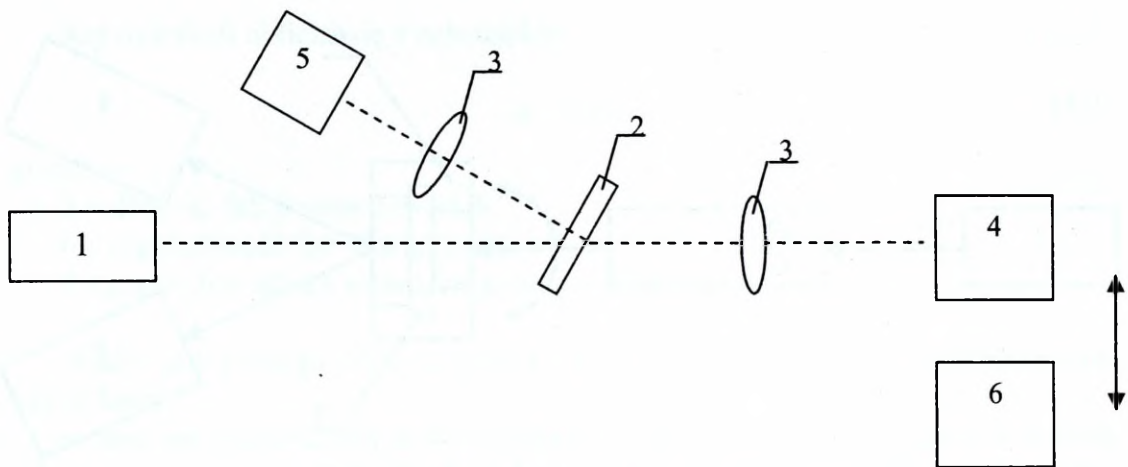
1 – źródło ciągłego promieniowania laserowego; 2 – układ optyczny; 3 – dzielnik dyfrakcyjny; 4 – wzorcowy przetwornik pomiarowy; 5 – kalibrowany przyrząd pomiarowy; 6 – oś obrotowa.

Dany typ dzielnika nie może być jednak wykorzystany na stanowisku wzorca roboczego mocy promieniowania laserowego, dlatego że na jego działanie mają wpływ nie tylko źródła promieniowania zabudowane na stanowisku, ale i źródła zewnętrzne, w szerokim zakresie widma. Powoduje to konieczność stosowania na stanowiskach wzorców dużej liczby siatek dyfrakcyjnych, co wiąże się z ciągłą ich zmianą stosownie do zakresu widma i z odpowiednim justowaniem układu optycznego stanowiska pomiarowego.

Ponadto źródła promieniowania laserowego nie są w pełni monochromatyczne, co powoduje, że przy stosowaniu siatek dyfrakcyjnych samo promieniowanie laserowe ulega rozkładowi w widmo i występują znaczne straty mocy. Z tych powodów przedstawiony schemat nie może być wykorzystany na stanowisku pomiarowym wzorca mocy promieniowania laserowego.

5.1.5. Schemat stanowiska pomiarowego wzorca z zastosowaniem układu pomiaru względnego poziomu mocy

Uproszczony schemat strukturalny stanowiska pomiarowego wzorca z zastosowaniem układu pomiaru względnego poziomu mocy przedstawiono na rysunku 5.4. Układ składa się z następujących podstawowych zespołów: źródła promieniowania laserowego (1), płytki dzielącej (2), układu optycznego (3), wzorcowego przetwornika pomiarowego (4), kontrolnego przyrządu pomiarowego (5), przetwornika pomiarowego sprawdzanego przyrządu pomiarowego (6).



Rys. 5.4. Schemat stanowiska pomiarowego wzorca mocy promieniowania laserowego z zastosowaniem dzielnika promieniowania laserowego zbudowanego na bazie siatki dyfrakcyjnej

1 – źródło ciągłego promieniowania laserowego; 2 – płytka dzieląca; 3 – soczewka; 4 – wzorcowy przetwornik pomiarowy; 5 – kontrolny przyrząd pomiarowy; 6 – przetwornik pomiarowy kalibrowanego przyrządu pomiarowego.

Zasada kalibracji (sprawdzania) na przedstawionym schemacie stanowiska polega na pomiarze wartości mocy optycznej za pomocą wzorcowego przetwornika pomiarowego (4) i następnie podstawieniu na jego miejsce przetwornika sprawdzanego przyrządu pomiarowego (6). Przy tym za pomocą przetwornika przyrządu kontrolnego (3) monitorowana jest zmiana mocy źródła promieniowania (1) w trakcie procesu kalibracji (przekazywania wielkości jednostki mocy promieniowania laserowego).

Rozpatrywany wariant transmisji mocy optycznej stosowany we wzorcach roboczych mocy jest szeroko znany i w tym opracowaniu nie będzie szczegółowo analizowany.

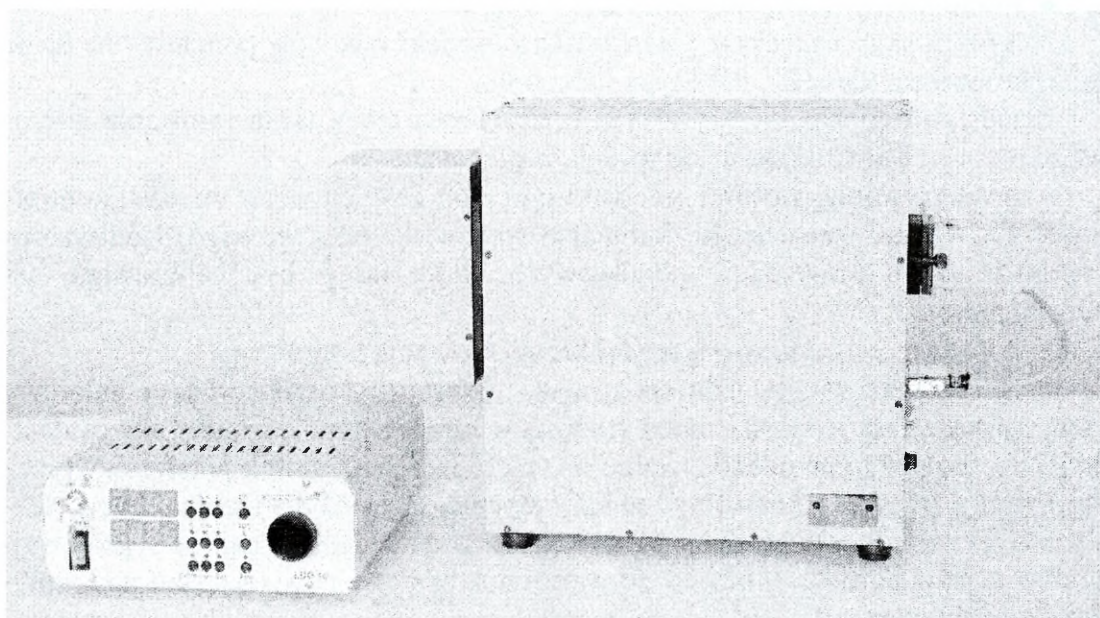
Znane wady tego układu pomiarowego, związane z długim czasem kalibracji, w rozpatrywanym przez nas przypadku zastosowania nie występują, ponieważ obecna technologia pozwala zbudować przetworniki mocy o bardzo dużej dokładności, ze stałą czasu nieprzekraczającą $\tau = 10$ s, co przy czasie pomiaru wynoszącym 10τ skraca proces przekazywania wartości jednostki miary do 2 minut.

Potrzeba obróbki znacznej ilości danych oraz konieczna wysoka jakość metrologiczna wyposażenia do pomiaru sygnałów elektrycznych są obecnie wymaganiami łatwymi do spełnienia ze względu na poziom techniki obliczeniowej i elektronicznych przyrządów cyfrowych.

Wymienione zalety i uwarunkowania stanowią wystarczająco istotną podstawę do wyboru schematu pomiarowego z zastosowaniem układu pomiaru względnego poziomu mocy do opracowania stanowiska pomiarowego wzorca roboczego mocy ciągłego promieniowania laserowego.

5.2. Wzorzec przenośny mocy ciągłego promieniowania laserowego

W akredytowanym Laboratorium Optoelektroniki WAT opracowano i eksploatowano przedstawiony poniżej wzorzec jednostki mocy ciągłego promieniowania laserowego (rysunek 5.5). Składa się on z zasilacza lasera, wymiennego bloku lasera wzorcowego, zestawu z blokiem sterującym i optycznym oraz komputera sterującego (nieprzedstawionego na rysunku). Komputer umożliwia sterowanie pracą wzorca za pośrednictwem bloku sterowania, analizę i zobrazowanie wyników uzyskanych w trakcie wzorcowania oraz ich archiwizację. Blok optyczny generuje światło laserowe wzorca, które wraz z wiązką przyrządu badanego kieruje do układu pomiarowego. Ten ostatni umożliwia obróbkę światła promieniowania laserowego pochodzącego z obu źródeł i ich analizę.



Fot. M.M.

Rys. 5.5. Wzorzec przenośny mocy ciągłego promieniowania laserowego

Schemat strukturalny stanowiska pomiarowego wzorca roboczego mocy ciągłego promieniowania laserowego według układu pomiarowego wybranego w wyniku przeprowadzonej analizy przedstawiono na rysunku 5.6.

Stanowisko pomiarowe wzorca mocy pokazane na schemacie pozwala na kalibrację i sprawdzanie mierników mocy promieniowania laserowego³². Zapewnia także możliwość przekazywania wielkości jednostki mocy promieniowania laserowego od wzorca przenośnego do przyrządów pomiarowych i systemów pomiarowych, dając gwarancję zachowania spójności tej grupy pomiarów.

³² J. Owsik, W. Skrzeczanowski, A. Długaszek, J. Janucki, M. Nowakowski; *Польская система...*, op. cit., s. 5–10.

Elementami stanowiska pomiarowego roboczego wzorca mocy są:

1. Aparatura do pomiaru średniego poziomu mocy promieniowania laserowego, przeznaczona do uzyskania informacji o wartości jednostki mocy średniej i przechowywania tej informacji. W skład aparatury wchodzi:

- wzorcowy przetwornik wartości średniej mocy typu kalorymetrycznego, wyposażony w uzwojenie podstawienia dla podania mocy elektrycznej;
- urządzenie do pomiaru sygnałów elektrycznych.

2. Aparatura do przekazania wartości jednostki mocy średniej promieniowania laserowego do przyrządu kontrolowanego, w skład której wchodzi:

- źródła promieniowania laserowego o długości fal 0,532 μm i 1,06 μm ;
- układ optyczny zawierający elementy skupiające i rozpraszające;
- bloki odbiorników „kontrolnych”;
- tłumik mocy promieniowania laserowego.

3. System sterowania pracą stanowiska i obróbki wyników pomiarów na bazie mikrokomputera klasy PC IBM typu notebook.

Przedstawione stanowisko wzorca przenośnego mocy promieniowania laserowego może być wykorzystane do dwóch trybów pracy:

- przekazywanie wartości jednostki mocy od zewnętrznego wzorca „kontrolnego” do wzorca przenośnego (kalibracja stanowiska pomiarowego) i od wzorca przenośnego do przyrządów pomiarowych, które mogą być kalibrowane lub sprawdzane;

- pomiar mocy wyjściowej źródeł promieniowania laserowego.

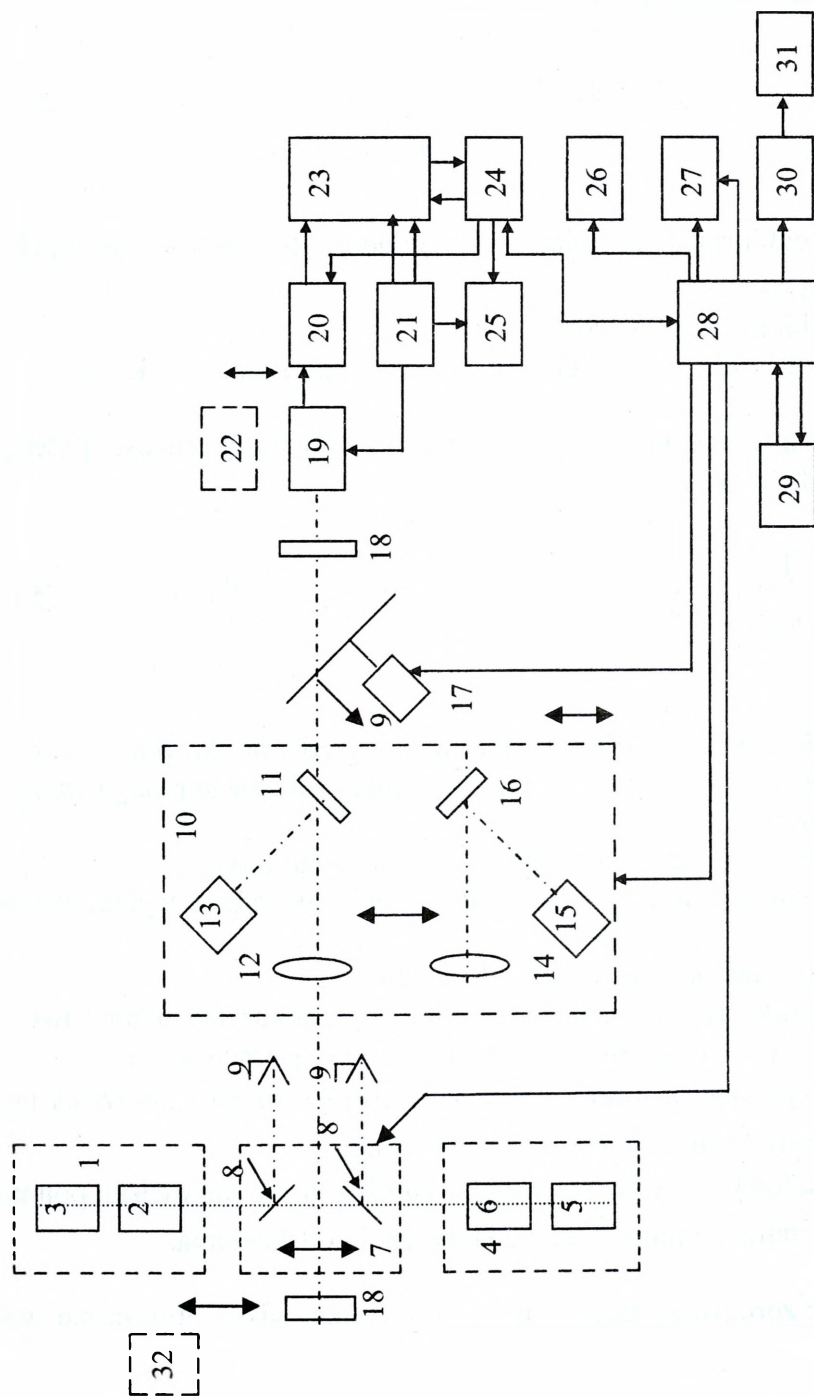
Przy przekazywaniu jednostki miary wzorcowy przetwornik pomiarowy otrzymuje wartość jednostki mocy średniej w postaci współczynnika ekwiwalentności K_E . Polega to na oddziaływaniu na wzorcowy przetwornik pomiarowy przez zewnętrzny wzorzec „kontrolny” mocą optyczną P_{opt} i ekwiwalentną mocą elektryczną P_0 , wprowadzoną do jego uzwojenia podstawienia i dającą sygnał wyjściowy z przetwornika, bliski co do wartości sygnałowi powstającemu pod wpływem oddziaływania P_{opt} .

Wartość współczynnika ekwiwalentności obliczana jest ze wzoru:

$$K_E = P_0/P_{\text{opt}} \quad (5.4)$$

Stabilność współczynnika K_E kontrolowana jest przez pomiar współczynnika przetwarzania A_E mocy elektrycznej dla wzorcowego przetwornika pomiarowego, która to stabilność jest źródłem informacji o ewentualnych stratach cieplnych przetwornika.

Wybrany schemat budowy stanowiska pomiarowego wzorca mocy promieniowania laserowego pozwala na przeprowadzenie pomiaru według algorytmu, zgodnie z którym moc promieniowania mierzona jest w pierwszej kolejności przez wzorcowy przetwornik mocy stanowiska, a następnie przez przetwornik kontrolowanego przyrządu pomiarowego.



Rys. 5.6. Schemat stanowiska pomiarowego wzorca mocy promieniowania laserowego z zastosowaniem dzielnika promieniowania laserowego zbudowanego na bazie siatki dyfrakcyjnej

- 1 – źródło promieniowania laserowego; 2 – głowica laserowa; 3 – blok zasilania; 4 – źródło promieniowania; 5 – blok zasilania; 6 – głowica laserowa; 7 – blok zmiany długości fali; 8 – zwierciadło; 9 – pułapka; 10 – blok odbiornika „kontrolnego”; 11 – płytka dzieląca K-8; 12 – soczewka $f = 200$; 13 – okno wejściowe „kontrolny” RTH35S; 14 – soczewka 200 BaF₂; 15 – odbiornik „kontrolny” RTH35G; 16 – płytka dzieląca BaF₂; 17 – okno BaF₂; 18 – okno wyjściowe; 19 – wzorcowy przetwornik promieniowania; 20 – przedwzmacniacz; 21 – dzielnik napięcia; 22 – kalibrowany przyrząd pomiarowy; 23 – przetwornik AC; 24 – interfejs; 25 – cyfrowy przyrząd pomiarowy; 26 – monitor; 27 – klawiatura; 28 – mikroprocesor sterujący; 29 – blok zasilania; 30 – RS-232; 31 – komputer; 32 – kalibrowane źródło promieniowania laserowego.

Przy tym za pomocą odbiornika „kontrolnego” monitoruje się ewentualne zmiany mocy źródła promieniowania laserowego w trakcie przekazywania wartości jednostki miary.

W tym przypadku w pierwszym etapie współczynnik odbicia płaskorównoległej płytki K_p obliczany jest ze wzoru:

$$K_p = \frac{P_{optswl}}{P_{optl}} = \frac{V_{kl}}{A_{sw} P_{optl}} \quad (5.5)$$

gdzie:

V_{kl} – wskazania odbiornika „świadka” przy podaniu mocy na wzorcowy przetwornik mocy stanowiska,

A_{sw} – czułość odbiornika „świadka”,

P_{optl} – moc optyczna zmierzona za pomocą wzorcowego przetwornika mocy.

Moc P_{optl} obliczana jest na podstawie danych, uzyskanych w procesie przekazania wartości jednostki miary, ze wzoru:

$$P_{optl} = \frac{1}{K_E} \left(P_{EL} + \frac{1}{A_{RWE}} \left(V_{OPT} - V_{EL} \left(1 + \gamma (t_{OPT} - t_{EL}) \right) \right) \right) \quad (5.6)$$

gdzie:

K_E – współczynnik ekwiwalentności wzorcowego przetwornika pomiarowego mocy uzyskany w trakcie przekazywania jednostki miary od zewnętrznego wzorca kontrolnego do stanowiska,

P_{EL} – elektryczna moc podstawienia, obliczona z iloczynu $I_{EL} U_{EL}$,

I_{EL} – prąd przepływający w uzwojeniu podstawienia, w trakcie wykonywania elektrycznej kalibracji,

U_{EL} – napięcie podawane na uzwojenie podstawienia,

A_{RWE} – współczynnik przetwarzania wzorcowego przetwornika pomiarowego stanowiska przy oddziaływaniu na niego mocy elektrycznej podstawienia,

V_{OPT} – sygnał wyjściowy z wzorcowego przetwornika mocy stanowiska pomiarowego przy oddziaływaniu na niego mocy optycznej,

V_{EL} – sygnał wyjściowy z wzorcowego przetwornika mocy stanowiska pomiarowego przy oddziaływaniu na niego mocy elektrycznej podstawienia.

Prędkość dryftu wzorcowego przetwornika mocy stanowiska oblicza się według wzoru:

$$\gamma = \frac{V_{EL(t_1 + \Delta t)} - V_{EL t_1}}{V_{EL t_1} \Delta t} \quad (5.7)$$

gdzie:

t_1 – czas początku rejestracji sygnału wyjściowego z wzorcowego przetwornika pomiarowego,

$t_1 + \Delta t$ – czas zakończenia rejestracji sygnału wyjściowego z wzorcowego przetwornika pomiarowego,

t_{OPT} – czas rozpoczęcia podawania mocy optycznej,

t_{EL} – czas rozpoczęcia podawania mocy elektrycznej podstawienia.

Wartość sygnału wyjściowego z wzorcowego przetwornika mocy optycznej V_{OPT} określa się ze wzoru:

$$V_{OPTm} = \left(\sum_5^{N-5} V_i + \left(\sum_{N-5}^N V_i - \sum_1^5 V_i \right) \left(\frac{\tau_m}{\tau_0 n_{OD}} - 0,5 \right) \right) \frac{1}{N} \quad (5.8)$$

gdzie:

τ_m – stała czasowa przetwornika pomiarowego,

m – wzorcowy przetwornik mocy stanowiska, odbiornik „kontrolny”, sprawdzany przyrząd pomiarowy,

τ_0 – czas pomiędzy dwoma kolejnymi odczytami,

n_{OD} – liczba odczytów określająca przesunięcie, licząc od początku działania mocy do uzyskania odpowiedzi w postaci sygnału wyjściowego,

N – liczba odczytów; odczyty są zdejmovane w ciągu czasu $2 \tau_m$, z jednego z odbiorników (o większej inercyjności) wzorcowego przetwornika mocy stanowiska lub przyrządu pomiarowego.

Wartość sygnału wyjściowego z wzorcowego przetwornika mocy elektrycznej V_{EL} obliczana jest ze wzoru:

$$V_{EL} = \frac{\sum_1^N V_{ELi}}{N} \quad (5.9)$$

W drugim etapie określana jest wartość współczynnika odbicia płaskorównoległej płytki K_{PL} za pomocą kalibrowanego (sprawdzanego) przyrządu pomiarowego.

$$K_{PL} = \frac{P_{OPTsw2}}{P_{OPT2}} = \frac{V_{k2}}{A_{SW} P_{OPT2}} \quad (5.10)$$

Porównując wyrażenia (5.5) i (5.10), otrzymujemy wartość średniej mocy ciągłego promieniowania laserowego na wejściu kalibrowanego (sprawdzanego) przyrządu pomiarowego.

$$P_{OPT2} = P_{OPT1} * \frac{V_{k2}}{V_{k1}} \quad (5.11)$$

W zależności od rodzaju pracy: kalibracja (sprawdzanie przyrządu pomiarowego) lub pomiar mocy wyjściowej źródła promieniowania laserowego będącego na wyposażeniu uzbrojenia i sprzętu wojskowego korzysta się ze wzorów (5.11) lub (5.6).

Analizując sygnał wyjściowy kalibrowanego (sprawdzanego) przyrządu pomiarowego lub źródła promieniowania laserowego będący efektem działania mocy na jego wejściu lub wyjściu, dokonuje się określenia charakterystyk metrologicznych, które dają informacje stanowiące odpowiedź na wymagania postawione w procedurach kalibracji (sprawdzania) techniki laserometrii.

W tabeli 5.1 przedstawiono charakterystyki metrologiczne przenośnego wzorca jednostki mocy promieniowania laserowego.

Tabela 5.1

CHARAKTERYSTYKI METROLOGICZNE WZORCA PRZENOŚNEGO JEDNOSTKI
MOCY PROMIENIOWANIA LASEROWEGO

Rodzaj parametru	Zakres wartości
Zakres spektralny dla przyrządu pomiarowego mocy	0,532 μm; 1,06 μm
Zakres spektralny dla źródeł promieniowania laserowego	0,4–12 μm
Zakres mocy	10 ⁻⁵ –10 W
Niepewność pomiarowa w zakresie 10 ⁻⁵ –10 ⁻¹ W	3·10 ⁻²
Niepewność pomiarowa w zakresie 10 ⁻¹ –10 W	1·10 ⁻²
Niepewność odtworzenia wielkości jednostki mocy	1·10 ⁻²
Niepewność przekazania wielkości jednostki mocy	1·10 ⁻²

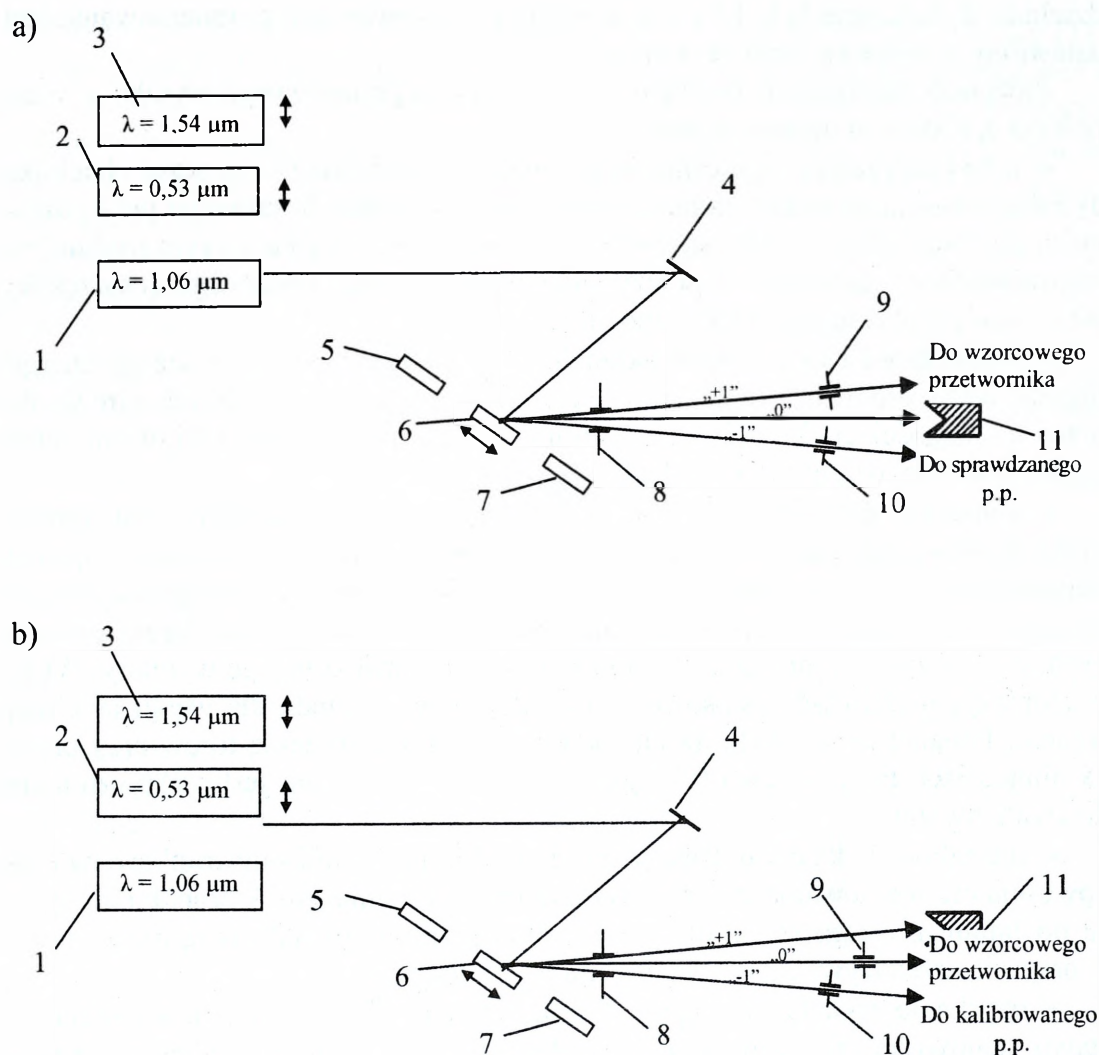
5.3. Układy przenośnego wzorca energii impulsowego promieniowania laserowego

5.3.1. Układ pomiarowy stanowiska z zastosowaniem siatki dyfrakcyjnej

Schemat optyczny stanowiska zbudowanego z dzielnikiem na siatce dyfrakcyjnej przedstawiono na rysunku 5.7a). Promieniowanie z laserów impulsowych (1, 2, 3) poprzez zwierciadło (4) pada pod pewnym kątem na powierzchnię roboczą jednego z regulowanych dzielników dyfrakcyjnych (5, 6, 7), z których każdy formuje dwa kanały:

- kanał plus lub minus pierwszego rzędu dyfrakcji,
- kanał rzędu zerowego dyfrakcji.

W pewnej odległości od siatek dyfrakcyjnych w kanale plus pierwszego rzędu ustawiony jest wzorcowy przetwornik promieniowania, a w kanale minus pierwszego rzędu – sprawdzany przyrząd pomiarowy. Pierwsza diafragma (8) ogranicza przejście wyższych rzędów dyfrakcji, a kolejne dwie (9, 10) przepuszczają tylko odpowiednio plus i minus pierwszy rząd dyfrakcji.



Rys. 5.7. Schemat optyczny układu pomiarowego wzorca roboczego energii impulsowego promieniowania laserowego z zastosowaniem dzielnika dyfrakcyjnego:

- a) w reżymie pomiaru średnich poziomów energii ($5 \cdot 10^3 - 0,15 \text{ J}$);
 b) w reżymie odtwarzania małych poziomów energii ($\sim 5 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-3} \text{ J}$)

1 – laser impulsowy LTI-247; 2 – laser impulsowy LTI-247 i PCZ-1; 3 – laser impulsowy LTI-139;
 4 – zwierciadło; 5, 6, 7 – regulowane dzielniki dyfrakcyjne dla średnich poziomów energii;
 8, 9, 10 – diafragmy; 11 – kuweta.

Kuweta (11) zapewnia pochłanianie energii promieniowania zerowego rzędu dyfrakcji. W procesie kalibracji (sprawdzania) energia promieniowania laserów (1, 2, 3) w kanale plus pierwszego rzędu mierzona jest za pomocą wzorcowego przetwornika pomiarowego i jednocześnie w kanale minus pierwszego rzędu – za pomocą kontrolowanego przyrządu pomiarowego.

W przypadku pracy wzorca roboczego energii impulsowego promieniowania laserowego w reżymie pomiaru małych poziomów (rysunek 5.7b) stosowane są

dzielniki dyfrakcyjne (12, 13 i 14), a wzorcowy przetwornik promieniowania jest ustawiony w zerowym rzędzie dyfrakcji.

Złożoność realizacji przedstawionego schematu pomiarowego wynika z wielu przyczyn, z których najważniejsze to:

- niewystarczająca optyczna wytrzymałość powierzchni roboczej dzielnika dyfrakcyjnego na działanie impulsowego promieniowania laserowego przy poziomach gęstości mocy w impulsie rzędu 10^8 W/cm², w związku z czym trudno jest zagwarantować stabilność współczynnika dzielenia, dla założonego (najczęściej stosowanego) okresu kalibracji stanowiska – 1 rok;

- konieczność stosowania w układzie pomiarowym wzorca roboczego energii impulsowego promieniowania laserowego sześciu dzielników dyfrakcyjnych do pracy na długościach fali 0,53 μm, 1,06 μm, i 1,54 μm (trzy dzielniki dla średnich poziomów i trzy dzielniki dla małych poziomów);

- konieczność zbudowania albo sześciu dzielników dyfrakcyjnych dla wymienionych wyżej długości fal z jednakowymi kątami dyfrakcji, gwarantując przy tym odpowiednio dokładne odtworzenie ich położenia (i pierwsze, i drugie są bardzo trudnym zadaniem technicznym), albo realizowanie rozdzielania torów optycznych, co znacznie utrudnia zestawienie stanowiska i zwiększa jego wymiary. Wady te eliminują możliwość zastosowania rozpatrywanego układu dla wersji mobilnej wzorca. Ponadto ze względu na złożoność zadania rozdzielania torów przy pracy na długościach fal 1,06 μm i 0,53 μm przedstawiony wariant jest praktycznie nie do zrealizowania;

- niestabilność kątów dyfrakcji, zależna od długości fali i uwarunkowana modowością promieniowania stosowanych laserów oraz zmianami kierunku od impulsu do impulsu, osiągająca wartość $\pm 2^\circ$. Wnosi to istotną składową niepewności w procesie przekazywania wielkości jednostki energii;

- uzyskanie zakładanych kątów dyfrakcji (rzędu 3^0-5^0), z punktu widzenia zestawu stanowiska, związane jest z problemami w technologii wykonania siatek dyfrakcyjnych z małą liczbą linii ($N = 5$) na milimetr, posiadających profil prostokątny. Sposób jonowego wytrawiania, pozwalający na uzyskanie wystarczająco dokładnego profilu linii i powierzchni o równomiernym współczynniku odbicia, znajduje się jeszcze w fazie badań.

5.3.2. Układ pomiarowy stanowiska z zastosowaniem płytki światłodziеляjącej i kontrolnego przyrządu pomiarowego

Schemat optyczny tego modelu stanowiska przedstawiono na rysunku 5.9. Promieniowanie laserów (1, 2 lub 3) podawane jest na światłodziеляjącą płytkę, która kieruje padającą na nią energię do dwóch kanałów. W kanale podstawowym, za pomocą diafragmy (4) i długoogniskowych soczewek w laserach, energia podawana jest na okno wejściowe wzorcowego przetwornika promieniowania (9). W odgałęzieniu promieniowanie podawane jest na okno wejściowe kontrolnego przetwornika promieniowania.

W procesie kalibracji przyrządu pomiarowego energia impulsu promieniowania laserów (1, 2, 3) w kanale podstawowym mierzona jest za pomocą wzorcowego

przetwornika, po czym na jego miejsce ustawiany jest przyrząd kalibrowany (11). Zmiana energii promieniowania w trakcie procesu kalibracji kontrolowana jest w oparciu o wskazania kontrolnego przetwornika promieniowania. Na podstawie wyników pomiarów energii promieniowania w kanale podstawowym określa się odpowiednią poprawkę w celu wyeliminowania błędu związanego ze zmianą energii promieniowania laserów.

Wysoka wartość gęstości mocy w impulsie laserów będzie powodować zmiany właściwości optycznych płytki światłodzielącej. Ponieważ przed każdym cyklem pomiarowym określa się stosunek wskazań wzorcowego i kontrolnego przetwornika, powstająca składowa błąd zostaje w pełni wyeliminowana i w ostateczności nie ma wpływu na błąd przekazywania wielkości jednostki energii w procesie kalibracji.

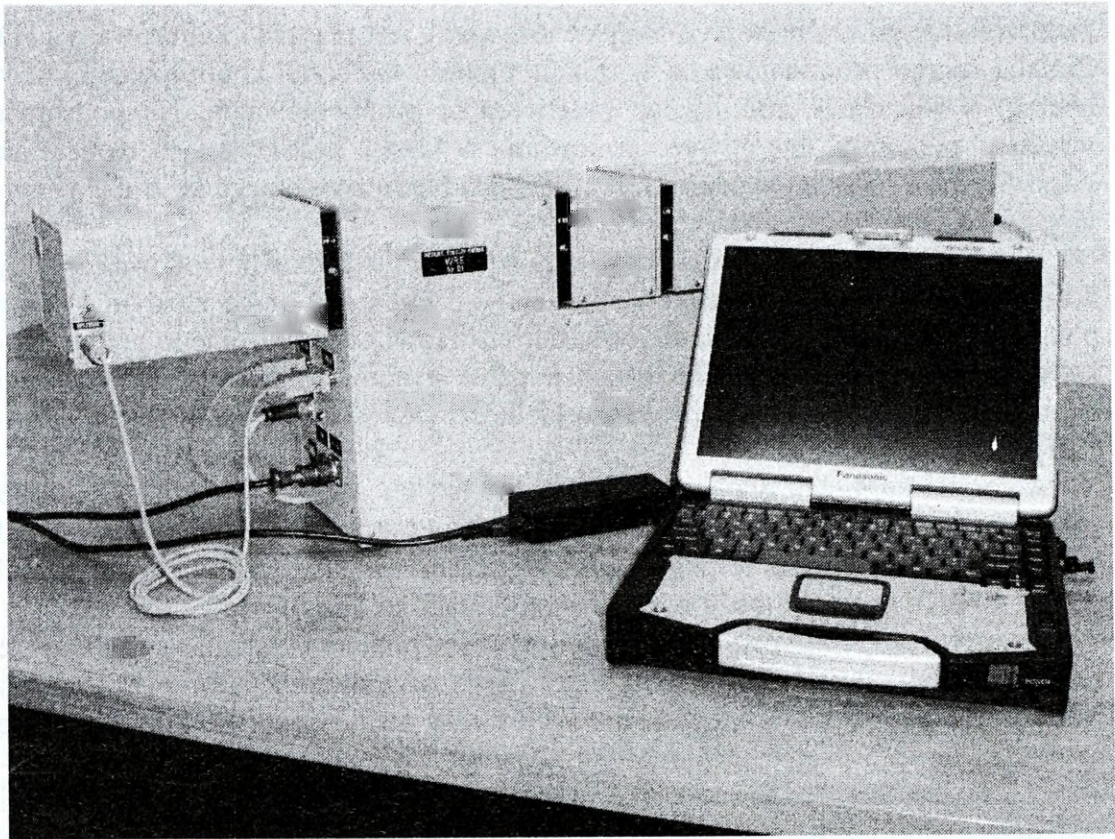
Algorytm kalibracji przyrządów pomiarowych na przedstawionym stanowisku bazuje na krótkotrwałej stabilności współczynnika transmisji (określa się go przed i po każdym cyklu pomiarów), który uwzględnia możliwe zmiany właściwości płytki światłodzielącej i może być określony z bardzo dużą dokładnością ($S_n \leq 5$). W tym układzie pomiarowym mogą być również podjęte działania o charakterze technicznym w odniesieniu do kanału głównego w celu zmniejszenia składowych błędów przekazywania wielkości jednostki energii, związanych z nierównomierną czułością przetwornika kontrolnego i zmianą płaszczyzny polaryzacji promieniowania laserów impulsowych. Z przeprowadzonej analizy wynika, że są to czynniki decydujące o przyjęciu powyższego wariantu układu pomiarowego do opracowania stanowiska pomiarowego wzorca przenośnego energii impulsowego promieniowania laserowego z zastosowaniem płytki światłodzielącej i kontrolnego przetwornika promieniowania.

5.4. Wzorzec przenośny energii impulsowego promieniowania laserowego

5.4.1. Charakterystyka wzorca

Podstawą przekazywania jednostki miary od wzorca przenośnego energii impulsowego promieniowania laserowego do kalibrowanego przyrządu pomiarowego jest zasada szeregowego pomiaru energii za pomocą wzorcowego przetwornika promieniowania i przetwornika promieniowania kalibrowanego przyrządu pomiarowego. W wyniku tego procesu określa się współczynnik przetwarzania przyrządu sprawdzanego lub współczynnik kalibracji³³. Zdjęcie wzorca przedstawiono na rysunku 5.8.

³³ J. Owsik, W. Skrzeczanowski, A. Długaszek, J. Janucki, M. Nowakowski, A. Zarwalska; *Portable low uncertainty calorimetric standard for energy unit of pulse laser radiation*, J.Tech.Phys. 2001, Vol. 42, No 4, s. 387–395; J. Owsik, A. Zarwalska, J. Janucki, V.B. Samoylov; *Portable three-wavelength standard for energy unit of pulse laser radiation*, SPQE&O 2004, Vol. 7, No 2, s. 202–206.



Fot. M.M.

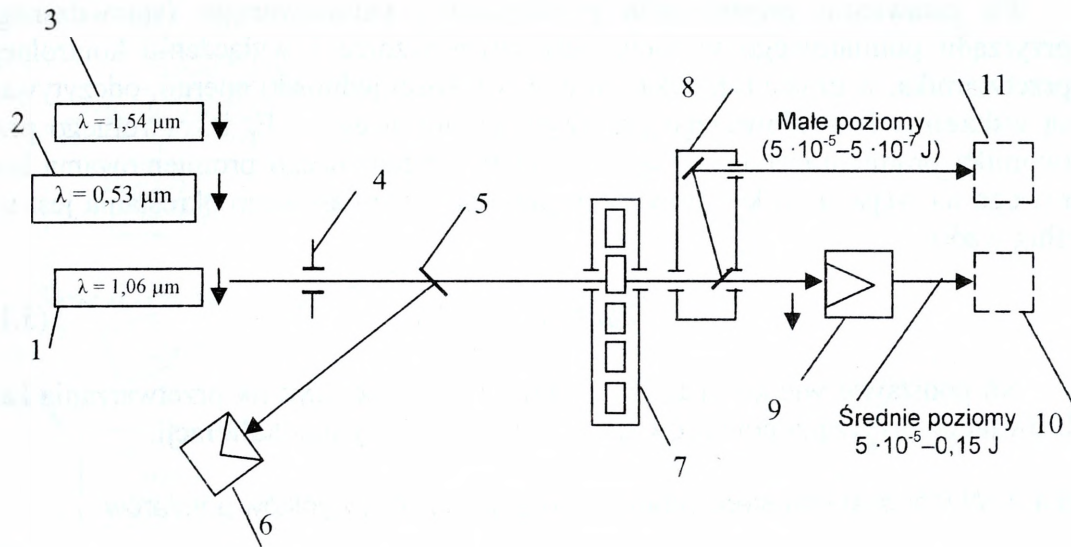
Rys. 5.8. Wzorzec przenośny energii impulsowego promieniowania laserowego

Wzorcowy przetwornik promieniowania jest kalibrowany za pomocą zewnętrznego wzorca-kontrolnego. Proces ten umożliwia określenie współczynnika ekwiwalentności K_e działania energii impulsowego promieniowania laserowego E_0 przy długości fali $0,5 \mu\text{m}$ i ekwiwalentnej energii impulsu elektrycznego E_e podawanego do uzwojenia podstawienia mocy elektrycznej kontrolnego przetwornika pomiarowego dającej sygnał wyjściowy na przetworniku kontrolnym, równy sygnałowi od energii promieniowania laserowego E_0 .

Kontrolny przetwornik promieniowania zapewnia stałą wartość jednostki energii w czasie między kolejnymi kalibracjami, przy zastosowaniu systemu kalibracji opartego na zamianie energii optycznej na energię elektryczną.

Wymagana dokładność pomiaru energii impulsowego promieniowania laserowego osiągana jest przy wykorzystaniu metody podstawienia energii impulsu elektrycznego doprowadzanej do uzwojenia nagrzewnicy elektrycznej kontrolnego przetwornika promieniowania.

Wielkość jednostki energii promieniowania przekazywana jest za pomocą urządzeń, w skład których wchodzi lasery impulsowe pracujące na długościach fal $1,06 \mu\text{m}$, $0,53 \mu\text{m}$ i $1,54 \mu\text{m}$.



Rys. 5.9. Schemat optyczny stanowiska pomiarowego wzorca przenośnego energii impulsowego promieniowania laserowego z zastosowaniem płytki światłodzielnącej i kontrolnego przyrządu pomiarowego

1 – laser impulsowy LTI-247; 2 – laser impulsowy LTI-247 i PCZ-1(zestaw); 3 – laser impulsowy LTI-139; 4 – diafragma; 5 – płytki światłodzielnąca; 6 – kontrolny przetwornik pomiarowy; 7 – tłumik kanału średnich poziomów energii; 8 – tłumik frenalowski dla kanału małych poziomów energii; 9 – wzorcowy przetwornik promieniowania; 10, 11 – miejsca dla kalibrowanych (sprawdzanych) przyrządów pomiarowych odpowiednio średnich i małych energii.

W celu wyeliminowania błędów spowodowanych zmianami energii promieniowania laserowego podczas przekazywania wielkości jednostki energii w skład stanowiska włączany jest kontrolny przyrząd pomiarowy względnej zmiany energii impulsowego promieniowania laserowego – kontrolny przetwornik promieniowania, którego funkcjonowanie w stanowisku ma na celu uwzględnienie możliwej niestabilności energii od impulsu do impulsu w czasie przekazywania wielkości jednostki energii.

Energia impulsowego promieniowania laserowego E_0 na wejściu do kontrolnego przetwornika pomiarowego określana jest metodą porównania sygnału wyjściowego przetwornika kontrolnego powstałego w wyniku oddziaływania impulsu promieniowania laserowego i energii impulsu elektrycznego (U_{00} i U_{E0}) odpowiednio, określania ekwiwalentnej energii elektrycznej E_E , współczynnika przetwarzania kontrolnego przetwornika promieniowania A_{E0} energii E_E i poprzez określenie E_{01} w czasie t_1 wg wzoru:

$$E_{01} = U_{00}/K \cdot E_{E0} \quad (5.12)$$

Jednocześnie z pomiarem U_{00} przeprowadzane są pomiary sygnału wyjściowego U_{K1} i U_{K2} .

Po ustawieniu przetwornika pomiarowego kalibrowanego (sprawdzanego) przyrządu pomiarowego w torze optycznym wzorca i wyłączeniu kontrolnego przetwornika, w czasie t_2 przekazywania wielkości jednostki energii, odczytywane są wskazania kontrolowanego przyrządu pomiarowego – E_p i kontrolnego przetwornika promieniowania – U_{k2} . Energia E_{02} impulsowego promieniowania laserowego na wejściu do kalibrowanego przyrządu pomiarowego określania jest według wzoru:

$$E_{02} = E_{01} \cdot U_{k2}/U_{k1} \quad (5.13)$$

Na podstawie wielkości E_{02} i E_p określa się współczynnik przetwarzania kalibrowanego przyrządu pomiarowego lub jego współczynnik kalibracji.

5.4.2. Wybór systemu sterowania, rejestracji i obróbki wyników pomiarów

Stanowisko zbudowane jest z bloków i modułów. Do sterowania pracą stanowiska proponuje się zastosować interfejs szeregowy, który posiada szereg zalet w porównaniu z interfejsem równoległym: mniejsza liczba linii komunikacji, brak wymagania karty sterowania, która powinna być zamontowana w komputerze, prosta realizacja sprzętowa i programowa.

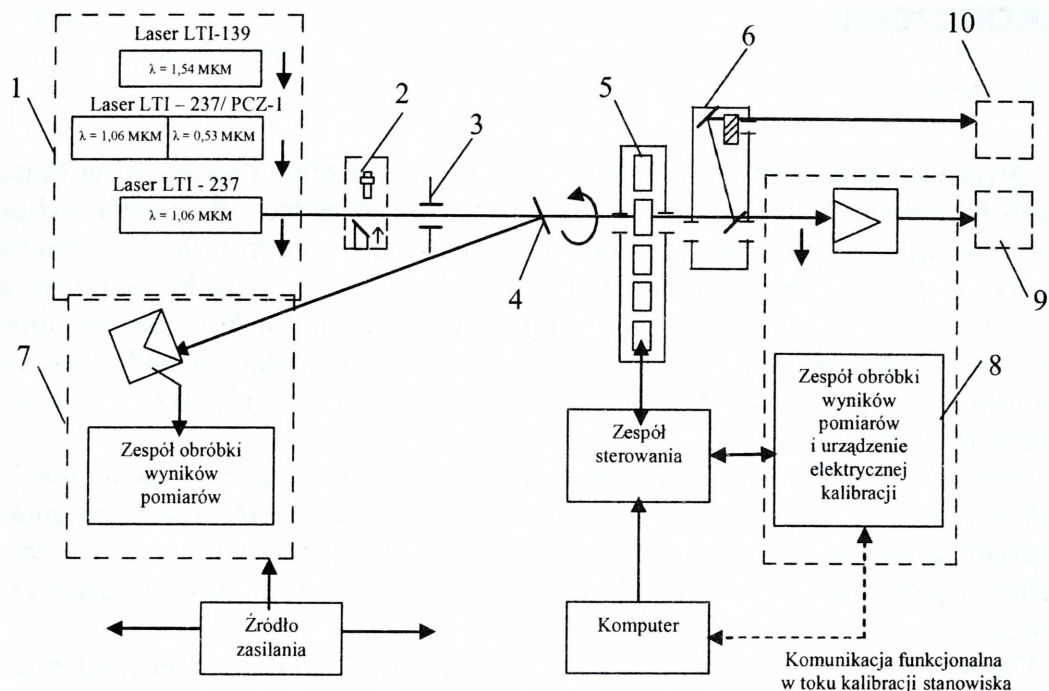
Podstawowym elementem części elektronicznej stanowiska jest mikroprocesor pozwalający na dużą elastyczność w sterowaniu aparaturą, znaczne zmniejszenie ilości aktywnych elementów elektronicznych, a w rezultacie, podwyższenie pewności działania tak oddzielnych zespołów, jak i całego stanowiska.

Rejestracja i wstępna obróbka wyników przez mikroprocesor realizowana jest wg poleceń wydawanych z komputera zlokalizowanego w pobliżu czujników promieniowania, co wraz z zastosowaniem przetworników analog-cyfra o dużej dokładności, podwyższa odporność na zakłócenia i charakterystyki metrologiczne wzorca. Również na polecenie wydawane z komputera wyniki przekazywane są do oprogramowania podstawowego w celu realizacji obróbki ostatecznej.

5.4.3. Opis schematu funkcjonalnego

Podstawowymi częściami składowymi (rysunek 5.10) stanowiska pomiarowego wzorca roboczego energii impulsowego promieniowania laserowego są:

- źródła promieniowania laserowego LTI-247, PCZ-1 lub LTI-139,
- wzorcowy przetwornik promieniowania,
- elektroniczny blok optyczny zawierający kontrolny przetwornik promieniowania,
- komputer typu Notebook.



Rys. 5.10. Schemat funkcjonalny stanowiska pomiarowego wzorca roboczego energii impulsowego promieniowania laserowego

1 – źródło promieniowania; 2 – urządzenie do justowania sprawdzanych przyrządów pomiarowych; 3 – diafragma; 4 – płytkę światłodzielającą; 5 – tłumik kanału średnich poziomów energii; 6 – tłumik Fresnela kanału małych poziomów energii; 7 – kontrolny przetwornik promieniowania; 8 – wzorcowy przetwornik promieniowania; 9, 10 – kalibrowane przyrządy pomiarowe średniej i małej energii.

Charakterystyki metrologiczne przenośnego wzorca jednostki energii promieniowania laserowego przedstawiono w tabeli 5.2.

Tabela 5.2
CHARAKTERYSTYKI METROLOGICZNE PRZENOŚNEGO WZORCA JEDNOSTKI ENERGII IMPULSOWEGO PROMIENIOWANIA LASEROWEGO

Rodzaj parametru	Zakres wartości								
	0,53 μm		1,064 μm			1,54 μm			
Długość fali promieniowania									
Zakres energii promieniowania	10–15 mJ	40–55 mJ	3–5 mJ	60–75 mJ	150–180 mJ	5–10 mJ	40–50 mJ	70–90 mJ	
Czas trwania impulsu promieniowania laserowego	40 ns		40 ns			1,5 ms			
Niepewność pomiarowa odtworzenia jednostki energii	0,8·10 ⁻²								
Niepewność pomiarowa przekazania jednostki energii	0,5·10 ⁻²								

ZAKOŃCZENIE

Opracowanie wzorców jednostek energetycznych techniki laserowej w Polsce oparto na doświadczeniach Stanów Zjednoczonych, Niemiec i Rosji. Wysoki poziom rozwoju tych wzorców decyduje o nasyceniu gospodarki techniką laserową. Stworzone tam systemy zabezpieczenia metrologicznego techniki laserowej są o wiele bardziej rozbudowane i obejmują zdecydowanie większe zakresy mocy i energii promieniowania laserowego. Systemy te funkcjonują na podstawie stosownych aktów prawnych i znajdują szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach gospodarki tych państw.

Podstawę ich bazy zabezpieczenia metrologicznego stanowią, podobnie jak w Polsce, wzorcowe przetworniki pomiarowe typu kalorymetrycznego, pracujące na zasadzie porównania mocy optycznej z mocą elektryczną. Błędy odtworzenia wielkości jednostki mocy i energii są na tym samym poziomie co w opisanych wzorcach.

Opracowanie i wykonanie wzorców z unikatową dokładnością charakterystyk eksploatacyjnych wymagało stosowania wielu nowych rozwiązań konstrukcyjnych, technologicznych i metrologicznych wszystkich ogniw łańcucha porównań. Specjalnego opracowania wymagały przetworniki pomiarowe wzorców, dzielniki promieniowania laserowego na siatkach dyfrakcyjnych, systemy pomiaru i rejestracji sygnałów elektrycznych.

Tak powstała baza zabezpieczenia metrologicznego uwzględnia tylko najbardziej rozpowszechnione w Polsce przyrządy pomiarowe do pomiaru mocy i energii promieniowania laserowego. Opracowany schemat kontroli metrologicznej umożliwia kalibrację przyrządów o zakresie długości fal 0,3–12 μm . Zakres ten wynika z faktu, że we wzorcach zastosowano szerokopasmowe przetworniki pomiarowe typu kalorymetrycznego, dla których składowa błąd współczynnika przetwarzania, uwarunkowana zmianą długości fali w tym zakresie, wynosi 0,5%. Krajowa baza zabezpieczenia metrologicznego techniki laserowej pozwala na pełne zaspokojenie potrzeb medycyny, nauki oraz techniki specjalnej. Rozwój techniki laserowej w kraju wymusza opracowanie bazy metrologicznej do kalibracji urządzeń wykorzystujących zarówno bardzo małe moce – rzędu mikrowatów (np. telekomunikacja wymaga zastosowania laserowego radiometru kriogenicznego), jak i bardzo duże – rzędu kilowatów (lasery technologiczne). Ponadto opracowano przenośne wzorce jednostki mocy i energii promieniowania laserowego, pozwalające na dotarcie z nimi do użytkownika. Należy tu nadmienić, że o szybkości rozbudowy bazy zabezpieczenia metrologicznego zadecyduje poziom możliwych do poniesienia kosztów.

Całościowe rozwiązanie problemu odtwarzania jednostek radiometrycznych w technice laserowej wniesie oryginalny wkład do rozwoju krajowej metrologii optoelektronicznej. Ułatwi także prowadzenie międzynarodowych porównań międzylaboratoryjnych.

Rozwój współpracy międzynarodowej w tym zakresie pozwala na weryfikację poglądów oraz poszukiwanie nowych, doskonalszych rozwiązań umożliwiających zwiększenie dokładności odtworzenia i przekazywania wielkości jednostek mocy i energii.

Opracowane i wykonane urządzenia (ogniwa łańcucha porównań) są przeznaczone do ochrony i odtwarzania wielkości jednostki mocy i energii promieniowania laserowego, a następnie ich przekazania kontrolowanym metrologicznie przyrządom pomiarowym (urządzenia do pomiaru mocy i energii promieniowania laserowego). Ochrona wielkości jednostki wata w laserometrii z dokładnością największą w długim okresie (kilka lat) jest możliwa obecnie tylko w jeden sposób: przy wykorzystaniu specjalnie opracowanego i metrologicznie dokładnie przebadanego przetwornika pomiarowego typu kalorymetrycznego. Wybrany przetwornik jest praktycznie nieselektywny w szerokim zakresie widmowym długości fal promieniowania laserowego. Detektor przetwornika, pracujący na zasadzie zamiany mocy optycznej na moc elektryczną, i odpowiednia elektroniczna aparatura pomiarowa umożliwiają ochronę i odtwarzanie jednostki mocy dla funkcji kalibratora związanej z przekazaniem wielkości jednostki mocy.

Przekazanie wielkości jednostki mocy jest możliwe tylko przy wykorzystaniu laserów metrologicznych. Różnią się one od zwykłych laserów podwyższoną stabilnością i unormowaniem parametrów wiązki promieniowania, wprowadzonej do przetwornika pomiarowego wzorca oraz urządzenia pomiarowego (kontrolowanego metrologicznie), któremu przekazywana jest wielkość jednostki. Wielkość jednostki mocy i energii przekazywana jest metodą bezpośrednią – laserem działania ciągłego o wymaganej mocy, energii i długości fali. W procesie przekazania wielkości jednostki uczestniczyć będzie część wzorca zawierająca formujący układ optyczny i dzielnik promieniowania laserowego. Istnieje także możliwość (wynikająca z zasady działania przetwornika pomiarowego) podawania różnych mocy i energii, co podniesie eksploatacyjne własności wzorca, a w szczególności – w związku z optymalizacją schematu strukturalnego wzorca i algorytmu przekazania jednostki – takie podejście może doprowadzić do znacznego skrócenia czasu odtworzenia i przekazania wielkości jednostki z jednoczesnym zmniejszeniem niepewności.

Wybór kierunku realizowanych badań będzie wynikał z przyjętej strategii rozwoju bazy metrologicznej. Baza ta ma na celu zapewnienie spójności pomiarowej wielkości jednostki mocy i energii promieniowania laserowego. Główne z nich dotyczyć będą zasady wyboru odtwarzania wielkości jednostki mocy promieniowania laserowego, zapewnienia kompatybilności bazy zabezpieczenia metrologicznego z systemami zagranicznymi oraz badań w zakresie wzorcowania i certyfikacji laserowego sprzętu metrologicznego. W metrologii laserowej pomiar parametrów i charakterystyk energetycznych promieniowania laserowego powinien bazować na odbiorniku wzorcowym. Wybór prawa fizycznego wykorzystanego w budowie takiego odbiornika (odbiornik typu kalorymetrycznego, fotoelektrycznego itp.) jest uwarunkowany konkretnymi potrzebami tworzenia systemu zabezpieczenia metrologicznego techniki laserowej. Przy opracowaniu zarówno wzorca,

jak i całej struktury hierarchicznej przekazywania wielkości jednostki przyrządom pomiarowym uwzględnia się specyfikę promieniowania laserowego. Dokładność wzorca oraz innych ogniw łańcucha metrologicznego decyduje o niepewności odтворzenia i przekazania wielkości jednostki, i temu problemowi poświęca się szczególnie dużo uwagi.

Ustalanie zadań do realizacji opiera się na analizie potrzeb w zakresie testowania, wzorcowania, kalibracji i obsługi sprzętu optoelektronicznego używanego w gospodarce narodowej i siłach zbrojnych, a także na ocenie stopnia poziomu zabezpieczenia kontroli metrologicznej techniki optoelektronicznej.

Wymiernym efektem podjętego problemu będzie opracowanie i wdrożenie nowego systemu zabezpieczenia metrologicznego techniki laserowej oraz nowych urządzeń pomiarowych. Będą to zatem:

- detektory pułapkowe stanowiące wzorce pośredniczące przy przekazywaniu wielkości jednostki mocy promieniowania laserowego (wata) od wzorca pierwotnego do wzorców lokalnych;
- wzorce lokalne, tj. wzorzec wielkości jednostki mocy średniej i energii promieniowania laserowego oraz wzorzec jednostki energii impulsowego promieniowania laserowego;
- wzorce przenośne, tj. przenośny wzorzec wielkości jednostki mocy promieniowania laserowego oraz przenośny wzorzec wielkości jednostki energii impulsowego promieniowania laserowego;
- opracowane i wdrożone procedury przekazywania wielkości jednostek mocy i energii promieniowania laserowego;
- funkcjonujący system kontroli metrologicznej przyrządów pomiarowych mocy i energii promieniowania laserowego.

BIBLIOGRAFIA

I. Artykuły i referaty

1. Anderson S.G., *Review and forecast of laser markets 1997*, Laser Focus World 1997, Vol. 33, No 1.
2. Birnbaum G., Birnbaum N., *Measurement of laser energy and power*, Proc. IEEE 1967, Vol. 55, No 6.
3. Calviello J.A., *An optical calorimeter for laser energy measurements*, Proc. IEEE 1963.
4. Dagang X., Sihua M., *Metrological Guarantee for Laser Safety International Symposium on the Safe Application of Laser Beams*, ISSA – Section Electricity, Beijing, 10–14 May 1988.
5. Długaszek A., Jankiewicz Z., Owsik J., *Standards of energetic units for laser technique*, Laser Technology V, 23–27 September 1996, Szczecin–Świnoujście, Proceedings SPIE 1997, Vol. 3186.
6. Edwards J.G., *An accurate carbone cone calorimeter for pulsed lasers*, J.Sci.Instrum. 1967, No 44.
7. Forrest G., *Applications for industrial laser continue to expand*, Laser Focus World 1997, Vol. 33, No 6.
8. Geist J., *On the possibility of an absolute radiometric standard based on the quantum efficiency of a silicon photodiode*, Proc. SPIE 1979, Measurements of Optical Radiations, No 196.
9. Higgins T.V., *Thermal detectors fell the heat of light*, Laser Focus World 1994, Vol. 30, No 11.
10. Killick D.E., Batmen D.A., Brown D.R. et al., *Power and energy measuring technique foe solid state lasers*, Infrared Physics 1966, No 6.
11. Koozekanani S., Deybe P.P., Krutchkoff A., Ciftan M., *Measuremetns of the laser output*, Proc. IRE 1962, Vol. 50, No 2.
12. Kotyuk A.F., Zagorskij J.T., *Principles of metrological protection of laser energy photometry* (in Russian), Izdatielstwo Standartov 1990.
13. Li T., Sims S.D., *A calorimeter for energy measurements of optical masers*, Appl. Optics 1962, No 1(3).
14. Metzford J., *Network and traceability of the radiometric and photometric standards at the PTB*, Metrologia 1993, Vol. 30, nr 4.
15. Metzford J., *Traceability in optical radiometry: new developments. Advances in metrology and its role in quality improvement and global trade*, Narosa Publishing House, New Delhi 1996.
16. Ohno Y., Parr A.C., *NIST radiometric and photometric units based on absolute detectors*, An International Conference in Metrology, CSIR, Pretoria 1997.
17. Owsik J., *Absorption coefficient of calorimetric receiver of laser radiation*, J.Tech.Phys. 1996, Vol. 37, No 1.
18. Owsik J., *Analiza rozwoju bazy systemu zabezpieczenia metrologicznego techniki laserowej w Polsce*, Metrology and Measuring Systems 1995, t. II, z. 1.
19. Owsik J., *A basis for metrological protection of energy laserometry*, J.Techn.Phys. 1997, Vol. 38, No 1.

20. Owsik J., *Błąd współczynnika dzielenia dyfrakcyjnego przetwornika promieniowania laserowego*, Metrology and Measuring Systems 1995, t. II, z. 3.
21. Owsik J., *Diffraction splitter of laser radiation with high splitting coefficient*, J.Tech.Phys. 1995, Vol. 36, No 2.
22. Owsik J., *Dzielnik dyfrakcyjny promieniowania laserowego z dużym współczynnikiem dzielenia*, Metrology and Measuring Systems 1995, t. II, z. 3.
23. Owsik J., *The essential aspects of metrological protection*, Laser technology IV: Research trends, instrumentation and applications in metrology and materials processing, 26–30 September 1993, Szczecin–Świnoujście, Proceedings SPIE 1995, Vol. 2202.
24. Owsik J., *Metrological instruments for energy measurements of laser working with Q-modulation*, Laser in research and engineering, Proceedings of the 12th international congress Laser 95, Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg 1996.
25. Owsik J., *Podstawy zabezpieczenia metrologicznego laserometrii energetycznej w Polsce*, Metrology and Measuring Systems 1995, t. II, z. 1.
26. Owsik J., *Polish metrological basis for the study of lasers*, Proc. SPIE 1999, Vol. 4018.
27. Owsik J., *The tasks and problems of organization of optoelectronic laboratory for metrology*, Laser technology IV: Research trends, instrumentation and applications in metrology and materials processing, 26–30 September 1993, Szczecin–Świnoujście, Proceedings SPIE 1995, Vol. 2202.
28. Owsik J., *Współczynnik absorpcji odbiornika kalorymetrycznego wzorca jednostki mocy średniej promieniowania laserowego*, Metrology and Measuring Systems 1995, t. II, z. 3.
29. Owsik J., *Wzorce wielkości energetycznych dla techniki laserowej*, [w:] *Metrologia i systemy pomiarowe*, PWN, Warszawa 1998, t. V, z. 1–2.
30. Owsik J., Kotyuk A.F., Liberman A.A., Ulanowsky M.V., *Aparatura metrologiczna do pomiaru energii impulsowego promieniowania laserowego*, Metrology and Measuring Systems 1995, t. II, z. 3.
31. Owsik J., Kotyuk A.F., Liberman A.A., Ulanowski M.V., *An apparatus for measuring the energy of pulse radiation of a laser*, J.Tech.Phys. 1995, Vol. 36, No 4.
32. Owsik J., Kotyuk A.F., Liberman A.A., Ulanowsky M.V., *Application of diffraction gratings as splitters of laser radiation*, J.Tech.Phys. 1995, Vol. 36, No 3.
33. Owsik J., Skrzeczanowski W., Długaszek A., Janucki J., Nowakowski M., *Polski system metrologicznego zabezpieczenia techniki laserowej*, Technologiczeskije Sistiemy 2002, No 3 (14).
34. Owsik J., Skrzeczanowski W., Długaszek A., Janucki J., Nowakowski M., Zarwalska A., *Portable low uncertainty calorimetric standard for energy unit of pulse laser radiation*, J.Tech.Phys. 2001, Vol. 42, No 4.
35. Owsik J., Skrzeczanowski W., Liberman A.A., Kotyuk A.F., *Standard of watt for high power levels of laser radiation*, Proc. SPIE 1999, Vol. 4018.
37. Owsik J., Zarwalska A., Janucki J., Samoylov V.B., *Portable three-wavelength standard for energy unit of pulse laser radiation*, SPQE&O 2004, Vol. 7, No 2.
38. Pietrzykowski J., *Wzorec pierwotny jednostki mocy promienistej oparty na radiometrze kriogenicznym*. Krajowy Kongres Metrologii, Gdańsk, 15–18.09.1998 r.
36. Rabinowicz S.G., *Pogresznosti izmierenij*, Energia 1978.
39. Sanders A.A., *The programs of the optical electronics metrology group*, NIST, Boulder, Colorado 1991.

40. Scott B.F., *Fabrication and performance of cone calorimeters for laser energy measurements*, J.Sci.Instrum. 1966, No 43.
41. Scott T.R., *NBS Laser power and energy measurements*, SPIE 1988, Laser Beam Radiometry, Vol. 888.
42. Smathers S.E., Maksymonko G., *Calorimetric measurement of optical power from pulsed lasers*, IEEE Transactiob on Instrumentation and Measurement 1972, IM-21, No 4.
43. Stock R.D., Hoter H., *Present State of the PTB Primary Standard for Radiant Power Based on Cryogenic Radiometry*, Metrologia 1993, Vol. 30.
44. Weiss S.A., *High-Power Lasers: Evolution Weeds out the Weak*, Photonics Spectra, June 1998.

II. Pozycje zwarte

1. *Laser Applications*, ed. Moute Ross, Academic Press, New York–London 1971, Vol. 1.
2. *Międzynarodowy słownik podstawowych i ogólnych terminów metrologii*, wyd. polskie, Główny Urząd Miar, Warszawa 1995.
3. Nowicki R., *Pomiary energii promienistej*, WNT, Warszawa, 1969.
4. *Teoria pomiarów*, red. H. Szydłowski, PWN, Warszawa 1981.
5. *Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik*, Główny Urząd Miar, Warszawa 1999.

III. Dokumenty normatywne

1. Ustawa GOST 8.275-91 GSI. *Państwowy pierwotny wzorzec i schemat środków przenoszenia średniej mocy i energii promieniowania laserowego Kriogeniczny radiometr absolutny pomiaru średniej mocy i energii promieniowania laserowego w skali długości fal 0,3–12,0 μm* , Standardy Krajowe Rosji, 1991, poz. 5c.
2. *Measurement, testing, calibration*, Physikalisch Technische Bundesansatalt, 1992.
3. Polska Norma PN-EN 28402 *Jakość. Terminologia*, Wydawnictwo normalizacyjne ALFA, Warszawa 1993.
4. Ustawa z dnia 11 maja 2001 r. – Prawo o miarach (tekst jednolity DzU z 2004 r., nr 243, poz. 2441).

**Zamówienia
na publikacje Akademii Obrony Narodowej
można składać telefonicznie lub pisemnie na adres:**

**Księgarnia AON
al. gen. A. Chruściela 103, bl. 40
00-910 Warszawa
tel./fax 022 681 46 08
e-mail: ksiegarnia.akademicka@aon.edu.pl**

**Wykaz publikacji znajduje się na stronie internetowej
księgarni akademickiej**

www.biblioteka.aon.edu.pl



Współautor książki, Andriej Fiedorowicz KOTYUK, urodził się w Leningradzie w 1927 r. W 1949 r. z wyróżnieniem ukończył Politechnikę Leningradzką i od tego momentu 58 lat pracy zawodowej poświęcił problematyce techniki pomiarowej i metrologii. Uważany za czołowego przedstawiciela szkoły współczesnych metrologów rosyjskich. Promotor 35 prac doktorskich i konsultant naukowy 20 prac habilitacyjnych z zakresu techniki pomiarowej. Opublikował ponad 350 prac, w tym 30 monografii, uzyskał 50 patentów ZSRR.

Jest doktorem nauk technicznych, profesorem, członkiem rzeczywistym Rosyjskiej Akademii Metrologicznej, zasłużonym metrologiem i zasłużonym pracownikiem nauki Federacji Rosyjskiej.

W 2005 r. za zasługi dla rozwoju polskiej metrologii w dziedzinie techniki laserowej uhonorowany przez Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej medalem „Pro Memoria”.

Obchodząc w 2007 r. jubileusz 80-lecia urodzin, A.F. Kotyuk nieprzerwanie kontynuuje swój trud naukowy na niwie metrologii w Instytucie Pomiarów Optyczno-Fizycznych (VNIIOFI) w Moskwie.