



Automatyzacja procedur diagnozowania źródeł promieniowania laserowego

KRZYSZTOF KICZYŃSKI, JAN OWSIK, MAREK SUPRONIUK¹

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki, ¹Instytut Podstaw Elektroniki,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W artykule zaprezentowano zasady, algorytmy oraz układy do pomiarów najważniejszych parametrów laserów. Pomiar mocy i energii stanowi podstawę diagnostyki laserowych źródeł promieniowania. Zaprezentowano zautomatyzowany wzorzec mocy i energii promieniowania laserowego zaprojektowany do pracy w systemie zabezpieczenia metrologicznego techniki laserowej.

Słowa kluczowe: elektronika, wzorce mocy i energii promieniowania laserowego, laserometria, diagnostyka laserów

1. Wstęp

Rozwój techniki laserowej i ciągła ekspansja obszarów jej zastosowań wywołują potrzebę jednoczesnego rozwoju nowych przyrządów do kontroli i pomiaru charakterystyk i parametrów promieniowania laserowego. Wykonanie nowych i eksploatacja już istniejących przyrządów z wciąż rosnącymi wymaganiami co do dokładności pomiarów wymaga prawidłowego funkcjonowania i ciągłego rozwijania systemu spójności pomiarowej charakterystyk energetycznych i parametrów promieniowania laserowego. Zgodnie z rekomendacją ISO parametrami tymi są moc średnia ciągłego i energia impulsowego promieniowania laserowego. Spójność pomiarową tych dwóch wielkości energetycznych gwarantuje system kontroli metrologicznej wyposażony we wzorce wielkości jednostek mocy i energii promieniowania laserowego.

2. Wzorce wielkości jednostek mocy i energii promieniowania laserowego

Doskonalenie urządzeń wykorzystujących promieniowanie laserowe wymaga coraz bardziej precyzyjnych pomiarów parametrów źródeł tego promieniowania. Kraje wysoko rozwinięte technologicznie dysponują własnymi systemami zabezpieczenia metrologicznego techniki laserowej [1, 2, 3]. Technika laserowa opanowała wiele gałęzi przemysłu, przynosząc oszczędności materiałów, zmniejszając koszt wytworzenia produktu, zwiększając precyzję i jakość wyrobu. Urządzenia laserowe stosowane są powszechnie. Z techniki laserowej korzysta także wojsko. W Polsce technika laserowa rozwija się zgodnie z tendencjami światowymi. Tworzenie krajowej bazy zabezpieczenia metrologicznego techniki laserowej dotyczącej parametrów energetycznych i przestrzennych promieniowania laserowego rozpoczęto od wzorców dla przyrządów pomiarowych mocy i energii promieniowania laserowego [4, 5, 6, 7].

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 podejmowane decyzje o sposobie i zakresie użycia złożonych systemów techniki laserowej. Przejawia się to w skuteczności użycia tych systemów oraz rzetelności oceny ich stanu technicznego.

Parametry i charakterystyki promieniowania laserowego można podzielić na energetyczne i częstotliwościowo-spektralne. Zgodnie z tym wprowadzono terminy: laserometria energetyczna i laserometria częstotliwościowo-spektralna. Najbardziej rozpowszechniły się w laserometrii energetycznej przyrządy pomiarowe mocy i energii promieniowania laserowego, gdyż te parametry najbardziej interesują użytkownika.

Wynikła w związku z tym konieczność rozwoju systemu metrologicznego zabezpieczenia laserometrii energetycznej. Baza metrologiczna i podporządkowanie urządzeń pomiarowych powinno odpowiadać ogólnie przyjętym prawom metrologii i zasadom tworzenia państwowych schematów kontroli metrologicznej. Zgodnie z tym, przy opracowaniu wzorców i schematów kontroli metrologicznej w obszarze laserometrii energetycznej w Polsce postawiono zadanie dokładności pomiarów, podyktowane potrzebami nauki i praktyki. Przyjęto przy tym, że:

- odtworzeniu z maksymalną dokładnością podlega taka energetyczna jednostka wielkości fizycznej, do której pomiaru istnieje rozwinięte zaplecze przyrządów pomiarowych oraz gwarantuje ona 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 móc porównać wielkości jednostek zarówno w obszarze promieniowania koherentnego, jak i niekoherentnego.

Schemat odtwarzania podstawowych jednostek promieniowania laserowego, sposób ich przenoszenia i kolejność przekazywania od wzorca jednostki mocy — wata [W] i jednostki energii — dżula [J] przyrządom pomiarowym tych wielkości fizycznych podstawowych metod kontroli przedstawiono na rysunku 1.

Podstawowa aparatura polskiej bazy metrologicznej w obszarze laserometrii to dwa wzorce:

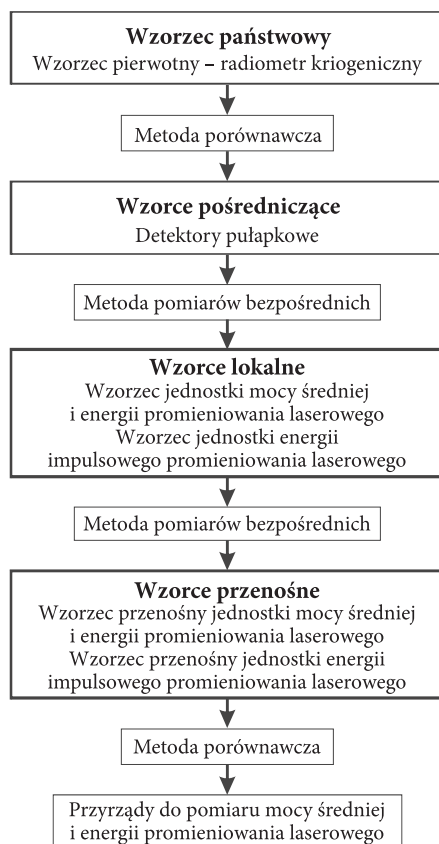
- wzorzec jednostki mocy średniej i energii promieniowania laserowego dla kontroli metrologicznej przyrządów pomiarowych dla długości fal 0,3-12 μm ;
- wzorzec jednostki energii impulsowego promieniowania laserowego dla kontroli metrologicznej przyrządów pomiarowych pracujących na długościach fal 0,53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

Na szczycie schematu kontroli metrologicznej znajduje się wzorzec jednostki mocy średniej i energii promieniowania laserowego. Wzorzec jest przeznaczony do ochrony i odtwarzania wielkości jednostek mocy i energii promieniowania laserowego, a następnie ich przekazania kontrolowanym metrologicznie przyrządom pomiarowym (urządzenia do pomiaru mocy i energii promieniowania laserowego) znajdującym się w użyciu w Polsce.

W Polsce taki system obecnie nie funkcjonuje, chociaż istnieją jego elementy składowe. Na rysunku 1 pokazano schemat struktury kontroli metrologicznej odpowiadający współczesnym standardom światowym w tej dziedzinie.

Opracowany schemat kontroli metrologicznej dla przyrządów pomiarowych promieniowania zapewnia kontrolę dużej liczby przyrządów znajdujących się w użyciu, różniących się między sobą charakterystykami spektralnymi, energetycznymi oraz dokładnością. Niższe ogniwo systemu kontroli metrologicznej stanowi wzorzec jednostki energii. Przyrządy pomiarowe w przedstawionym schemacie kontroli metrologicznej to:

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



Rys. 1. Planowana struktura kontroli metrologicznej w Polsce

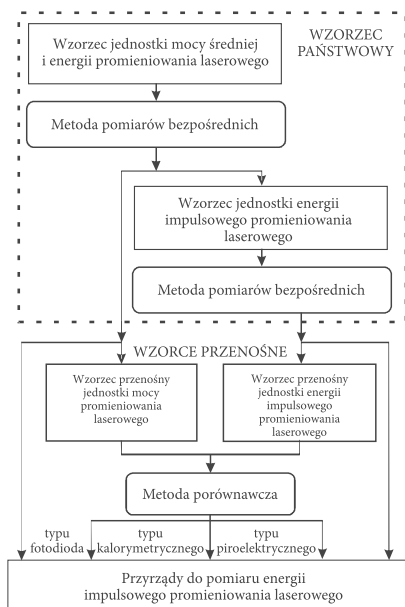
Obydwa wzorce są strukturalnie identyczne i zawierają:

- lasery przeznaczenia metrologicznego;
- 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 posiadających unikatową dokładność charakterystyk eksploatacyjnych wymagało zastosowania szeregu nowych rozwiązań konstrukcyjnych, technologicznych i metrologicznych wszystkich ogniw schematu sprawdzającego.

Rozwiązania dotyczące łańcuchów porównań i spójności pomiarowej wzorców radiometrycznych i fotometrycznych opisano w pracach Metzdorfa [7] i Ohno [8]. Zarówno w Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Niemcy, jak i w National Institute of Standards and Technology (NIST), USA, rolę wzorca pierwotnego pełni radiometr kriogeniczny.

Przystępując do opracowania nowego łańcucha porównań, założono, że łańcuch ten w pierwszym rzędzie powinien ukazywać przejścia od radiometru kriogenicznego jako wzorca pierwotnego do wzorców wtórnych zapewniających pomiary mocy i energii promieniowania laserowego. Projekt łańcucha porównań przedstawiono na rysunku 2. Jako wzorzec państwowy jest używany zazwyczaj radiometr kriogeniczny. Jest pierwszym i podstawowym ogniwem w łańcuchu porównań, pracuje z laserami stabilizowanymi, stanowiąc bazę dla wszystkich pomiarów radiometrycznych.

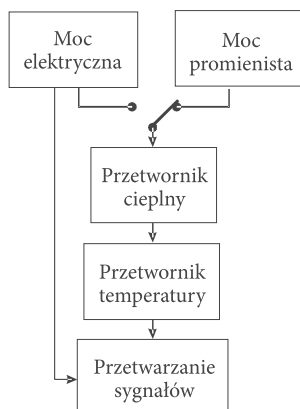


Rys. 2. Nowy łańcuch porównań w metrologii promieniowania laserowego

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

3. Radiometry podstawienia elektrycznego

Szczególnie dużą przydatnością na wzorce radiometryczne cechują się 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 podstawienia elektrycznego pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat radiometru podstawienia elektrycznego

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 założeniu, 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 uznawane za uniwersalny wzorec pierwotny jednostki mocy promienistej — wata — w większości przodujących laboratoriów metrologicznych na świecie. Niepewność pomiaru mocy promienistej przy stosowaniu radiometru kriogenicznego ocenia się na około 0,01%. Radiometr kriogeniczny zainstalowany w Głównym Urzędzie Miar [9] posiada 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 jest specjalną warstwą czarną o współczynniku pochłaniania wynoszącym 0,9998 w szerokim zakresie widmowym. Grzejnik radiometru wykonany jest 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.

4. Odbiorniki pałapkowe

Dokładne poznanie przebiegu przetwarzania fotonów na elektrony w krzemowych fotodiodach półprzewodnikowych doprowadziło do opracowania przez Geista [10] metody samokalibracji czułości widmowej fotodiod. Metoda samokalibracji czułości widmowej fotodiod krzemowych, polegająca na określeniu wydajności przetwarzania fotonów na elektrony przy równoczesnym uwzględnieniu strat odbiciowych i rekombinacyjnych, jest obecnie szeroko 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:

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

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 dla wyznaczenia czułości widmowej fotodiody wystarczy 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 z kolei wyeliminować lub istotnie je zmniejszyć poprzez przyłożenie odpowiedniego napięcia polaryzującego.

W celu dalszego uproszczenia zależności (1), przez 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:

$$\rho_r(\lambda) = [\rho(\lambda)]^n, \quad (2)$$

gdzie n jest liczbą odbić od wszystkich fotodiod.

Zarówno samokalibrowane fotodiody krzemowe, jak i zbudowane z nich odbiorniki typu pułapka świetlna 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 jak i 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.

5. Wzorzec jednostki mocy średniej i energii promieniowania laserowego

Wzorzec jest przeznaczony do ochrony i odtwarzania wielkości jednostek mocy i energii promieniowania laserowego, a następnie ich przekazania kontrolowanym metrologicznie przyrządom pomiarowym (urządzenia do pomiaru mocy i energii promieniowania laserowego) znajdującym się w użyciu w Polsce [11, 12]. Zdjęcie wzorca przedstawiono na rysunku 4.

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.

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 laserów zwykłych podwyższoną stabilnością parametrów promieniowania. Wiązka laserowa wprowadzona jest do przetwornika pomiarowego wzorca (PPW) jak i PP, któremu przekazywana jest



Rys. 4. Sterowany komputerowo wzorec jednostki mocy średniej i energii promieniowania laserowego

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 uczestniczy część wzorca zawierająca formujący układ optyczny i dzielnik promieniowania laserowego.

W opracowanym wzorcu PPW i kontrolowanego przyrządu pomiarowego jednocześnie przyjmowane są 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 1:1 [12]. Niezbędny w tym przypadku jest dzielnik optyczny atestowany metrologicznie. Dla rozpatrywanego wzorca takim dzielnikiem jest odbiciowa siatka dyfrakcyjna o „głębokim” profilu nacięć.

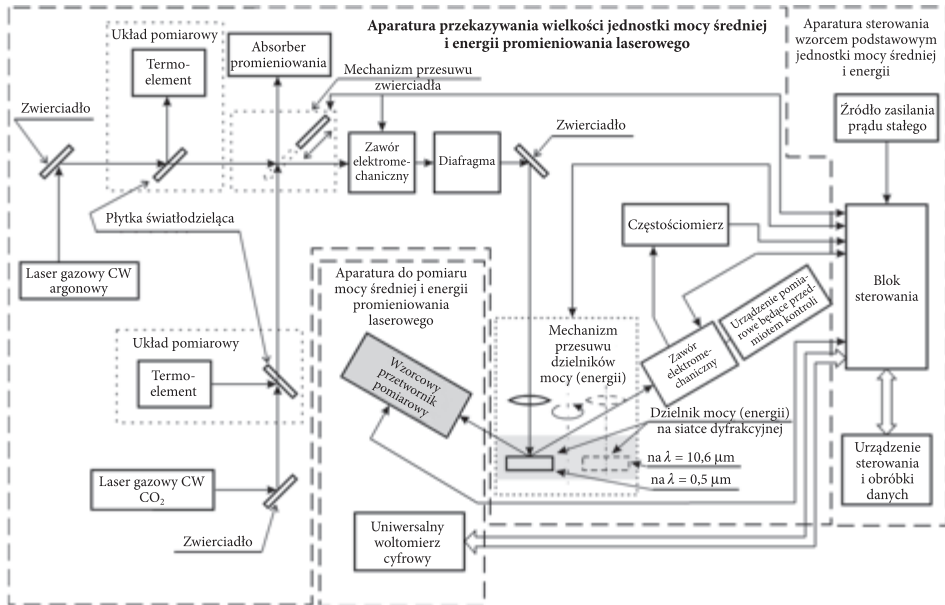
Zaletą takiego rozwiązania jest jednoczesne padanie promieniowania na oba przetworniki. W wyniku tego praktycznie odpada konieczność stabilizacji parametrów lasera i odpowiednio skraca się czas niezbędny do przekazania wielkości jednostki mocy i energii.

Schemat wzorca przedstawia rysunek 5 [12], a widok elementów rysunek 4. 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 wzorcem.

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 PP przebiega następująco. Promieniowanie laserowe o długości fali $0,5 \mu\text{m}$ lub $10,6 \mu\text{m}$ przechodzi przez układ optyczny i pada na dzielnik mocy (energii) na siatce dyfrakcyjnej. Dyfrakujące 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 zabezpiecza sterowanie procesem 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.



Rys. 5. Schemat automatycznego wzorca jednostki mocy średniej i energii promieniowania laserowego

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

6. Zasada odtwarzania i przekazania wielkości jednostki mocy średniej ciągłego promieniowania laserowego

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

W etapie pierwszym mamy do czynienia tylko z przetwornikiem wzorca, scharakteryzowanym współczynnikiem ekwiwalentności K_1 zamiany mocy optycznej mocą elektryczną. Do odbiornika roboczego i identycznego odbiornika kompensacyjnego podawane są jednocześnie odpowiednio 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 etapie drugim na odbiornik roboczy i kompensacyjny wzorca i kontrolowanego PP jednocześnie podaje się jednakową moc elektryczną i mierzy sygnały wyjściowe odbiorników przetwornika wzorca $U_{r.wz}$, $U_{k.wz}$ i kontrolowanego PP $U_{r.k.}$, $U_{k.k.}$, po czym oblicza się stosunki sygnałów wyjściowych:

$$M = \frac{U_{r.wz.}}{U_{k.wz.}}; N = \frac{U_{r.k.}}{U_{k.k.}}. \quad (3)$$

W etapie trzecim dokonuje się jednoczesnego podania mocy optycznej i elektrycznej na oba przetworniki, przy czym równolegle P_{opt} jest podawana na odbiorniki robocze, a moc elektryczna P_{el} — na odbiorniki kompensacyjne 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:

$$P_{opt} = \frac{1}{M \cdot K_1} \cdot \frac{V_1}{V_2} \cdot P_{el}, \quad (4)$$

a także współczynnik ekwiwalentności K_2 zamiany mocy optycznej mocą elektryczną kontrolowanego PP:

$$K_2 = \frac{K_1 \cdot V_3 \cdot V_2'}{V_1' \cdot V_4} \cdot \frac{M}{N}. \quad (5)$$

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.).

7. Zasada odtwarzania i przekazania wielkości jednostki energii ciągłego promieniowania laserowego

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:

$$Q_{opt} = P_{opt} \cdot \tau_{opt}, \quad (6)$$

gdzie P_{opt} określa wzór (4).

Na uzwojenie elektryczne kontrolowanego PP podawany jest impuls energii elektrycznej

$$Q_{el} = P_{el} \cdot \tau_{el} = I \cdot U \cdot \tau_{el}, \quad (7)$$

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 energią elektryczną w kontrolowanym przetworniku pomiarowym

$$K_3 = \frac{V_{opt}}{P_{opt} \cdot \tau_{opt}} \cdot \frac{P_{el} \cdot \tau_{el}}{V_{el}}, \quad (8)$$

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

8. Zasada odtwarzania i przekazania wielkości jednostki energii impulsowego promieniowania laserowego

Wzorec 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:

$$A_{opt} = \frac{V_{opt}}{Q_{opt}}. \quad (9)$$

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:

$$A_{el} = \frac{V_{el}}{Q_{el}}. \quad (10)$$

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

$$K_E = \frac{A_{opt}}{A_{el}}. \quad (11)$$

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:

$$A_{el} = \frac{V_{el}}{U_{el} I_{el} \tau_{el}}. \quad (12)$$

Na etapie drugim energia optyczna jednocześnie podawana jest na PPW i kontrolowany PP na podstawie:

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

Otrzymujemy stąd energię impulsu promieniowania laserowego na wejściu kontrolowanego PP zgodnie z wyrażeniem

$$Q_{WE PP} = Q_{opt} K_D, \quad (13)$$

gdzie K_D — współczynnik dzielenia siatki dyfrakcyjnej.

Moc optyczną wyznacza się z zależności

$$Q_{opt} = \frac{V_{opt}}{K_E A_{el}}, \quad (14)$$

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.

9. Podsumowanie

Pomiary opisane w artykule są zautomatyzowane. Wyboru procedury pomiarowej dokonuje się w menu programu komputerowego sterującego pracą wzorca. Program jest wyposażony w funkcję autokalibracji wzorca oraz kontroli działania elementów systemu, dzięki czemu obsługa wzorca sprowadza się do zamocowania badanego źródła promieniowania i wybrania procedury pomiarowej. Eksploatowane dotychczas w laboratorium Instytutu Optoelektroniki układy wzorców mocy i energii promieniowania laserowego były budowane osobno dla laserów pracy ciągłej i impulsowej. Przedstawione urządzenie znacznie upraszcza procedury pomiarowe, a jednocześnie zachowuje wysoką dokładność wynikającą z metody podstawienia elektrycznego i dodatkowo wyeliminowania czynnika ludzkiego z procesu diagnozowania lasera.

W dalszej perspektywie czasowej planowane jest zastosowanie opisanego wzorca w charakterze wzorca państwowego jednostki mocy i energii promieniowania laserowego.

Artykuł wpłynął do redakcji 14.12.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w grudniu 2009 r.

LITERATURA

- [1] *Laser Applications*, ed. by Moute Ross, vol. 1, Academic Press, N.Y. and London, 1971.
- [2] 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, Poland, Proc. SPIE, vol. 2202, 1995, 330-332.
- [3] J. OWSIK, *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, Poland, Proc. SPIE, vol. 2202, 1995, 333-335.
- [4] J. OWSIK, *Analiza rozwoju bazy systemu zabezpieczenia metrologicznego techniki laserowej w Polsce*, Metrology and Measuring Systems, t. 2, z. 1, PWN, Warszawa, 1995, 73-80.
- [5] J. OWSIK, *Podstawy zabezpieczenia metrologicznego laserometrii energetycznej w Polsce*, Metrology and Measuring Systems, t. 2, z. 1, PWN, Warszawa, 1995, 80-92.
- [6] A. A. SANDERS, *The programs of the optical electronics metrology group*, NIST, Boulder, Colorado, 1991.
- [7] J. METZDORD, *Traceability in optical radiometry: new developments. Advances in metrology and its role in quality improvement and global trade*, Narosa Publishing House, New Delhi, 1996, 297-306.
- [8] Y. OHNO, A. C. PARR, *NIST radiometric and photometric units based on absolute detectors*, An International Conference in Metrology, CSIR, Pretoria, 1997.
- [9] J. OWSIK, A. F. KOTYUK, A. A. LIBERMAN, M. V. ULANOWSKY, *Application of diffraction gratings as splitters of laser radiation*, J. Tech. Phys., 36, 3, 1995, 351-357.
- [10] A. DŁUGASZEK, Z. JANKIEWICZ, J. OWSIK, *Standards of energetic units for laser technique*, Laser Technology V, 23-27 September 1996, Szczecin-Świnoujście, Poland, Proc. SPIE, vol. 3186, 1997, 394-406.

-
- [11] J. OWSIK, *Wzorce wielkości energetycznych dla techniki laserowej*, Metrologia i systemy pomiarowe, t. 5, z. 1-2, 1998, 61-79.
- [12] J. OWSIK, *Polish metrological basis for the study of lasers*, Proc. SPIE, vol. 4018, 1999, 50-54.

K. KICZYŃSKI, J. OWSIK, M. SUPRONIUK

Automation of diagnose procedures of laser radiation sources

Abstract. Rules, algorithms and systems for measurement of the most important laser parameters were presented in this paper. Measurement of the power and energy is the basis of laser devices diagnostics. Automatic standard device of the lasers power and energy, designed for a laser metrological protection of energy laserometry was shown.

Keywords: electronics, laser standard devices, laserometry, lasers diagnostics

