

Antoni SARZYŃSKI

POMIARY CHARAKTERYSTYK WIĄZEK LASEROWYCH STOSOWANYCH DO OBRÓBKI MATERIAŁÓW

STRESZCZENIE W pracy zamieszczono wyniki pomiarów charakterystyk laserów stosowanych do obróbki materiałów. Zamieszczono schemat układu pomiarowego. Opisano charakterystyczne cechy wiązek Gaussowskich i sposób obliczania parametru M^2 , charakteryzującego jakość wiązki laserowej. Podano prawa podobieństwa dla różnych układów ogniskujących. Mierzono rozkłady gęstości energii w przekroju poprzecznym wiązki, czasowy kształt impulsu, stabilność mocy wiązki w funkcji czasu oraz wyznaczano parametr M^2 . Pomiary przeprowadzono dla lasera He-Ne, lasera włóknowego ciągłego działania SPI-100C o mocy 100 W, włóknowego lasera impulsowego Ylia M20EG oraz pikosekundowego lasera Nd:YAG. Podano przykłady czynników zwiększających błędy pomiarowe. Zamieszczono przykłady zastosowania wyników pomiarów do procesu znakowania laserowego.

Słowa kluczowe: impuls laserowy, parametr M^2 , wiązka gaussowska, prawa podobieństwa układów ogniskujących

1. WSTĘP

Rozkład gęstości energii (lub mocy) w przekroju poprzecznym wiązki wywiera ogromny wpływ na jakość laserowej obróbki materiałów. Do wielu rodzajów obróbki niezbędna jest wiązka laserowa o wysokiej jakości. Dotyczy to

Dr inż. Antoni SARZYŃSKI
e-mail: asarzyński@wat.edu.pl

Zakład Techniki Laserowej, Instytut Optoelektroniki
Wojskowa Akademia Techniczna

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 256, 2012

np. eksperymentów z dziedziny laserowej syntezy termojądrowej, gdzie gęstość mocy zogniskowanej wiązki laserowej powinna osiągnąć ekstremalnie wysoką wartość, czy też typowego zastosowania technologicznego, jakim jest wiercenie otworów o małych średnicach.

Do ilościowego opisu jakości wiązki używany jest tzw. parametr M^2 . W artykule opisano pomiary rozkładów gęstości mocy w wiązках laserowych oraz czasowych kształtów impulsów. Gdy było to możliwe, szacowano również wartość parametru M^2 . Trzeba jednak pamiętać, że pojedyncza liczba M^2 nie może w pełni charakteryzować jakości wiązki. Jakość rzeczywistej wiązki w konkretnej aplikacji może zależeć od czynników, które nie wpływają na wartość parametru M^2 . W wielu procesach, np. w metodzie platerowania laserowego, najlepsze efekty uzyskuje się, gdy wiązka ma stałą gęstość mocy w przekroju poprzecznym, wówczas wykorzystuje się tzw. integratory, które powodują zwiększenie parametru M^2 do wartości rzędu 10-100.

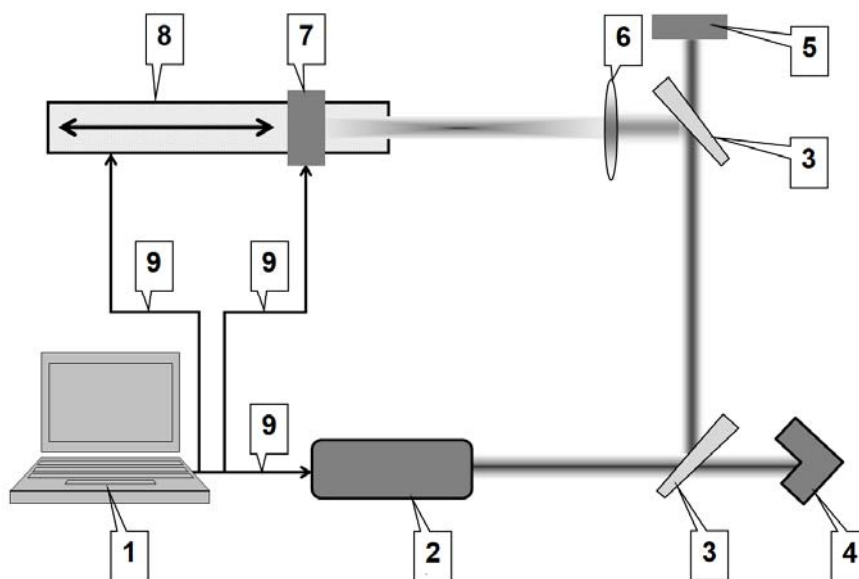
Mierzono czasowe kształty impulsów, ich zależność od mocy lasera i częstości generacji. Mierzono zmiany rozkładów gęstości mocy wzdłuż osi wiązki ogniskowanej przez soczewkę o długości ogniskowej $f = 500$ mm. Wykonywano również pomiary stabilności emitowanej mocy.

Głównym celem wykonywanych pomiarów była ocena jakości laserów zakupionych w ramach projektu OPTOLAB.

2. UKŁAD POMIAROWY

Schemat układu pomiarowego zamieszczono na rysunku 1. W skład układu wchodził komputer (1) służący do sterowania urządzeń i akwizycji danych. Badany laser (2) emitował wiązkę padającą na kliny optyczne (3), których każda powierzchnia odbijała około 5% padającego promieniowania. Absorber (4) służył do całkowitego stłumienia wiązki przechodzącej przez pierwszy klin optyczny. Zastosowano go ze względów bezpieczeństwa. Miernik mocy (5) służył do niezależnego od analizatora pomiaru mocy wiązki laserowej. Soczewka (6) o długości ogniskowej $f = 500$ mm ogniskowała promieniowanie padające na analizator BP109UV (7). Analizator był umieszczony na trójwymiarowym przesuwie XYZ (8).

Komputer zawierał oprogramowanie służące do sterowania lasera (2), przesuwu XYZ (8) oraz analizatora (7). Z powodu konfliktów w dostępie do portów USB, w rzeczywistości konieczne było użycie dwóch niezależnych komputerów. W układzie występowały dodatkowe elementy regulacyjne służące do precyzyjnej regulacji kierunku propagacji wiązki laserowej.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego:

- 1 – komputer służący do sterowania i akwizycji danych;
- 2 – laser;
- 3 – kliny optyczne;
- 4 – absorber wiązki laserowej;
- 5 – miernik mocy promieniowania laserowego;
- 6 – soczewka ogniskująca;
- 7 – analizator wiązki BP109UV;
- 8 – przesuw XYZ;
- 9 – przewody USB

Zadaniem klinów optycznych było znaczne osłabienie wiązki padającej na miernik mocy oraz na analizator (około 400 razy). Każdy klin optyczny emitował dwie wiązki optyczne propagujące się w różnych kierunkach. Ze względów bezpieczeństwa niewykorzystane wiązki tłumiono za pomocą odpowiednich przesłon.

Przesuw XYZ umożliwiał precyzyjne pozycjonowanie umieszczonego na nim analizatora z dokładnością do 16 μm . Zakres przesuwu wzdłuż każdej osi wynosił 300 mm.

Średnica czynna analizatora BP109UV wynosi 9 mm. Analizator może służyć do pomiaru rozkładów wiązek o średnicy od 20 μm do 9 mm. Użyta fotodioda pozwala na rejestrację promieniowania o długości fali od 200 do 1100 nm. Dopuszczalny zakres mocy wiązki laserowej od 10 nW do 10 W. Przyrząd służy głównie do pomiaru wiązek o mocy ciągłej. Producent podaje, że można również rejestrować promieniowanie laserów impulsowych o częstotliwości nie niższej niż 10 Hz. Analizator rejestruje rozkłady gęstości mocy padającego promieniowania w dwóch prostopadłych kierunkach XY, a ponadto mierzy moc padającego promieniowania. Dla porównania w układzie zastosowano niezależny miernik mocy.

3. WIĄZKI GAUSSOWSKIE I PARAMETR M^2

W przypadku wielu laserów, rozkład gęstości mocy w przekroju poprzecznym wiązki można opisać równaniem tzw. wiązki gaussowskiej [1]:

$$I(r, z) = I_0 \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \exp \left[-2 \left(\frac{r}{w} \right)^2 \right], \quad (1)$$

gdzie:

$$d(z) = 2w(z) = d_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z - z_0}{z_R} \right)^2}, \quad (2)$$

$$z_R = kd_0^2 / 2, \quad (3)$$

- d_0 – średnica przewężenia wiązki ($w_0 = d_0/2$ – promień);
- z_0 – położenie płaszczyzny przewężenia wzdłuż osi wiązki;
- z_R – tzw. zasięg Rayleigha, czyli odległość od płaszczyzny ogniskowej, na której średnica wzrasta od wartości d_0 do $d_0\sqrt{2}$;
- $k = 2\pi/\lambda$ – liczba falowa,
- (r, z) – współrzędne w układzie cylindrycznym,
- w – bieżący promień wiązki.

Ważną wielkością jest tzw. niezmiennik wiązki gaussowskiej, zdefiniowany wzorem [1]:

$$d_0 \cdot \theta = \frac{4}{\pi} \lambda, \quad (4)$$

gdzie θ oznacza rozbieżność wiązki (w grubym przybliżeniu $\theta = D_0/f$, gdzie D_0 oznacza średnicę wiązki padającej na soczewkę o długości ogniskowej f).

Średnica przewężenia wiązki gaussowskiej jest związana z długością fali, ogniskową soczewki oraz średnicą wiązki padającej na soczewkę [2, 3]:

$$d_0 = \frac{4\lambda f}{\pi D_0}. \quad (5)$$

Stosowana w przeszłości praktyka badania jakości wiązki polegała na ocenie dokładności aproksymacji rzeczywistego rozkładu za pomocą wiązki gaussowskiej. Okazało się jednak, że jest to metoda zawodna, gdyż fakt, iż wiązka ma gaussowski rozkład w jednej płaszczyźnie nie daje pewności, że taka pozostaje w innych płaszczyznach [2, 3]. Takie zjawisko zmiany charakteru rozkładu gęstości mocy wzdłuż osi może zachodzić dla wiązek wielomodowych [4]. Z tego powodu International Organization for Standardization wprowadziła koncepcję parametru M^2 , który liczbowo określa, ile razy średnica rzeczywistej wiązki w przewężeniu jest większa od średnicy przewężenia idealnej wiązki gaussowskiej o granicznej rozbieżności dyfrakcyjnej. Można to wyrazić wzorem [5, 6]:

$$M^2 = \frac{\pi d_0 \cdot \theta}{4\lambda}. \quad (6)$$

Prawa fizyki stanowią, że wartość parametru M^2 nie może być mniejsza od 1. Ograniczenie to jest skutkiem dyfrakcji promieniowania. Dla idealnej wiązki gaussowskiej mamy $M^2 = 1$. Wartość parametru M^2 jest podawana w katalogach producentów laserów. Parametr M^2 w sposób ilościowy charakteryzuje jakość wiązki laserowej. Zwany jest on także współczynnikiem jakości wiązki laserowej lub współczynnikiem propagacji wiązki.

Koncepcja współczynnika M^2 pozwala nie tylko w sposób ilościowy ocenić jakość wiązki, ale również przewidzieć ewolucję promienia wiązki za pomocą prostej procedury rozszerzającej analizę wiązek gaussowskich. Wystarczy we wzorach (1, 2) opisujących wiązkę gaussowską zamienić długość fali na iloczyn długości fali i współczynnika M^2 . Trzeba jednak pamiętać o ograniczeniach tej metody. Metoda ta może być stosowana do wiązek o kształcie zbliżonym do wiązki gaussowskiej lub w tych przypadkach, w których średnicę wiązki wyznaczono metodą $D4\sigma$. Przy tym zastrzeżeniu, ten sposób szacowania wiązek laserowych można rozszerzyć na wiązki o kształcie niegaussowskim. To podejście zostało szczegółowo opisane w normie ISO 11146 [5].

Zgodnie z normą ISO 11146 [5], współczynnik M^2 można obliczyć z pomiarów kaustyki, czyli zależności średnicy wiązki od odległości wzdłuż kierunku propagacji. Istnieje wiele procedur obliczeniowych, różniących się definicją średnicy wiązki lub sposobem aproksymacji wyników pomiarowych.

Średnica modu podstawowego TEM_{00} zogniskowanej wiązki laserowej $d(z)$ zmienia się w funkcji odległości $(z-z_0)$ od płaszczyzny ogniskowej (przewężenia) według wzoru (2). Tej samej funkcji (ale z innymi współczynnikami) możemy użyć do aproksymacji zależności średnicy wiązki od współrzędnej z dla rzeczywistej wiązki, co pozwoli wyznaczyć poszukiwaną wartość parametru M^2 . Po podniesieniu do kwadratu funkcję (2) można przedstawić w postaci:

$$y = Az^2 + Bz + C, \quad (7)$$

gdzie $y = d^2$. Równanie (2) opisuje hiperbolę we współrzędnych (d, z) , natomiast równanie (7) parabolę we współrzędnych (y, z) . Za pomocą dowolnego oprogramowania (MATLAB, Excel, Mathcad itp.) można łatwo wyznaczyć współczynniki aproksymacji (A, B, C) danych pomiarowych za pomocą paraboli (7), a z nich obliczyć wartości poszukiwanych współczynników występujących we wzorze (2):

$$z_0 = -0.5B/A; d_0 = \sqrt{C - Az_0^2}; z_R = d_0/\sqrt{A}. \quad (8)$$

Ze wzoru (2) można wyznaczyć rozbieżność wiązki θ :

$$\theta = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{d}{dz} [d(z)] = \frac{d_0}{z_R}. \quad (9)$$

Po podstawieniu tak obliczonych wartości średnicy przewężenia d_0 oraz rozbieżności θ do wzoru (6) obliczamy rzeczywistą wartość parametru M^2 dla badanej wiązki laserowej.

4. ZASADY PODOBIEŃSTWA UKŁADÓW OGNISKUJĄCYCH

Propagację wiązek laserowych można modelować za pomocą tzw. równania parabolicznego [4]. Równanie to pozwala wprowadzić zasady podobieństwa rozkładów gęstości mocy w wiązkach laserowych ogniskowanych przez soczewki o różnych długościach ogniskowych.

Zanim podamy wzory podobieństwa, warto przypomnieć podstawowy wzór, wiążący średnicę przewężenia d_0 ze średnicą D_0 rzeczywistej wiązki o parametrze M^2 padającej na soczewkę o długości ogniskowej f [3]:

$$d_0 = \frac{4\lambda f M^2}{\pi D_0}. \quad (10)$$

Ze wzoru (10) wynika, że jeśli chcemy zmniejszyć średnicę wiązki laserowej w płaszczyźnie ogniskowej, to można to zrealizować na cztery sposoby:

- skrócić długość fali promieniowania (przetworzyć wiązkę na wyższą harmoniczną);
- zastosować soczewkę o krótszej ogniskowej;
- zmniejszyć wartość parametru M^2 (np. metodą filtracji przestrzennej);
- zwiększyć średnicę wiązki padającej na soczewkę.

Ze wzoru (10) wynika także, że zasięg Rayleigha (3) jest proporcjonalny do kwadratu długości ogniskowej.

Po tych przygotowaniach można już podać wzory podobieństwa dla wiązek ogniskowanych przez układy ogniskujące o różnych długościach ogniskowych.

Przypuśćmy, że za pomocą analizatora omawianego w niniejszej pracy wykonaliśmy pomiary rozkładów gęstości mocy, używając soczewki o długości ogniskowej f_1 , w odległości z_1 od płaszczyzny ogniskowej. Wiązka miała moc P_0 . Eksperyment wykonujemy, używając soczewki o długości ogniskowej f_2 . Chcemy wiedzieć, jakiej płaszczyźnie z_2 odpowiada zmierzony rozkład, jak przeskalować współrzędną radialną oraz jak obliczyć rzeczywistą wartość gęstości mocy w płaszczyźnie z_2 .

Z równania parabolicznego [4] można wyprowadzić zasady podobieństwa dla współrzędnych:

$$z_2 = z_1 \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 / \left\{ 1 + \frac{z_1}{f_1} \left(1 - \frac{f_2}{f_1} \right) \right\} \cong z_1 \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2, \quad (11)$$

$$r_2 = r_1 \left(\frac{f_1}{f_2} \right) \left(\frac{x_2}{x_1} \right) \cong r_1 \left(\frac{f_2}{f_1} \right). \quad (12)$$

Rzeczywisty rozkład gęstości mocy obliczymy ze wzoru:

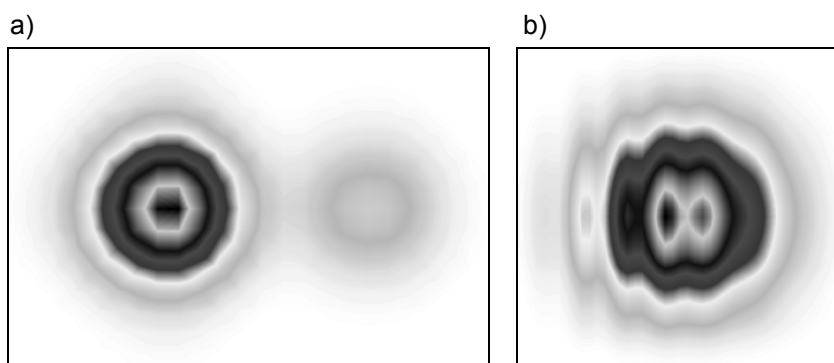
$$J_{\text{exp}}(r_2, x_2) = \frac{P_0}{2\pi} \frac{J_{\text{measured}}(r_2, x_2)}{\int_0^{\infty} J_{\text{measured}}(r, x_2) r dr}. \quad (13)$$

Praktyczne wykorzystanie formuły (13) może wymagać pewnych zabiegów uśredniających, gdyż analizator rejestruje rozkłady tylko w dwóch kierunkach poprzecznych X , Y [6].

5. LASER He-Ne

Na rysunku 2 zamieszczono dwa charakterystyczne przykłady rozkładów gęstości mocy lasera He-Ne, powstających w niewłaściwie skonfigurowanych układach pomiarowych. W pierwszym przypadku, gdy do kierowania wiązki zastosowano pryzmat bez warstw antyrefleksyjnych, wiązce zasadniczej towarzyszy wiązka zakłócająca (rys. 2a). W drugim przypadku, wiązka zasadnicza była zaburzona przez wiązki odbijające się od powierzchni soczewki niezawierającej warstw antyrefleksyjnych, co w efekcie doprowadziło do interferencji widocznej na rysunku 2b.

Zarówno wiązka dodatkowa jak i interferencja zmieniają rozkłady gęstości mocy w wiązce padającej na analizator (rys. 2), co powoduje zmianę rozkładu i średnicy, a w końcu błędne obliczenie wartości parametru M^2 .

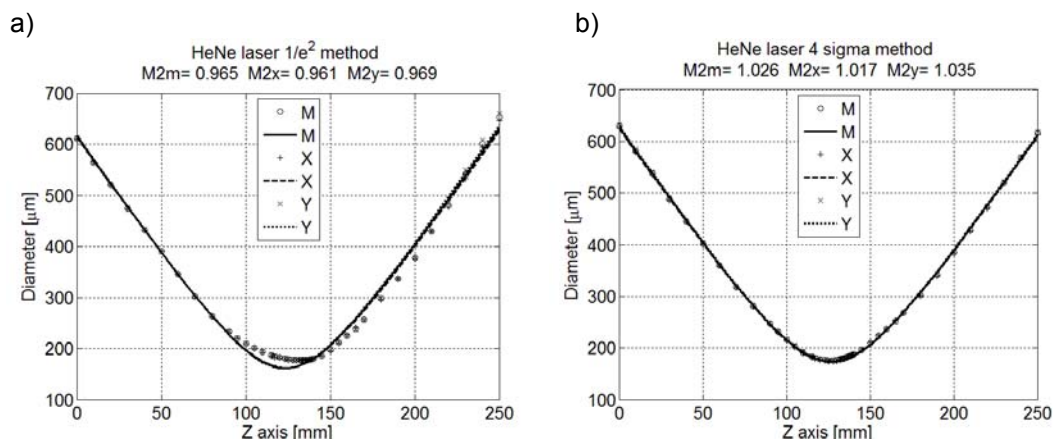


Rys. 2. Wizualizacja rozkładów gęstości mocy lasera HeNe o mocy 15 mW:

- a) wiązka zasadnicza jest zaburzona przez wiązkę pasożytniczą, odbitą od powierzchni pryzmatu;
- b) interferencja wiązki zasadniczej z wiązką odbitą od powierzchni soczewki

Pomiary średnicy w funkcji położenia wykonywano kilkakrotnie dla nieco różnych konfiguracji układu pomiarowego. Na rysunku 3 zamieszczono wyniki jednej z serii pomiarów średnicy wiązki ogniskowanej przez soczewkę w funkcji położenia wzdłuż osi wiązki. Wiązka lasera HeNe charakteryzuje się długą drogą spójności, dlatego przy dokładnym ustawieniu soczewki trudno było uniknąć zakłócającego wpływu odbić od jej powierzchni na rozkład wiązki padającej na analizator. Metoda $D4\sigma$ daje poprawną wartość parametru $M^2 = 1.04$, co jest zgodne z certyfikatem producenta $M^2 < 1.1$.

Analizator rejestruje także moc padającej wiązki. Odchyłki mocy dla lasera HeNe nie przekraczały 0.4% wartości średniej.



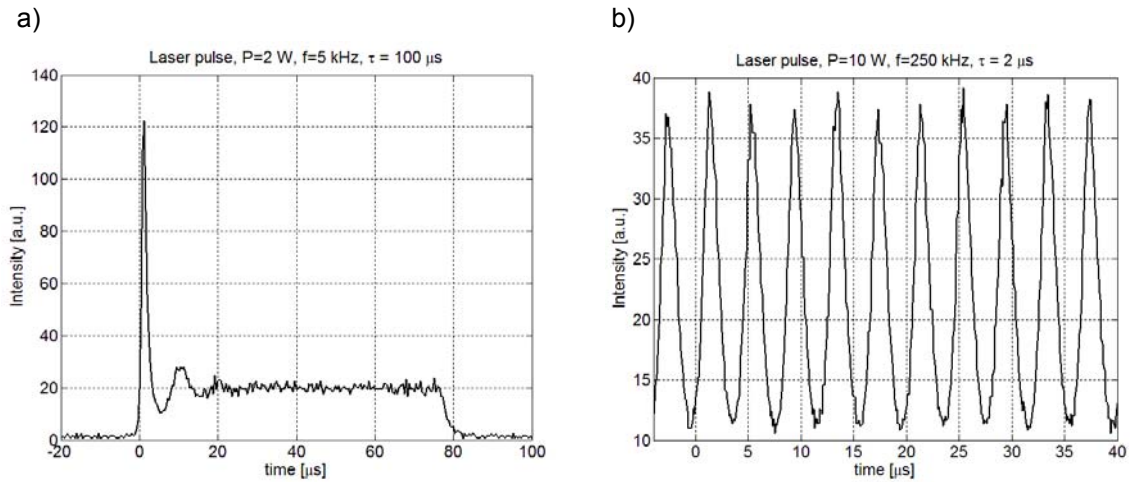
Rys. 3. Aproksymacje wyników pomiarów obliczone dla tej samej wiązki różnymi metodami: a) metoda $1/e^2$; b) metoda $D4\sigma$. Markerami zaznaczono dane pomiarowe, liniami ciągłymi narysowano krzywe aproksymacyjne. M – wyniki uśrednione względem kierunków X i Y ; X , Y – wyniki dla kierunków X i Y , odpowiednio

6. ITERBOWY LASER WŁÓKNOWY SPI-100C

Iterbowy laser włóknowy SP-100C o mocy 100 W został zaprojektowany jako źródło energii przeznaczone do zabudowania w urządzeniu służącym do obróbki materiałów w warunkach przemysłowych. Laser może pracować w trybie pracy ciągłej lub impulsowej. W trybie pracy impulsowej laser może służyć zarówno do spawania za pomocą długich impulsów o czasie trwania rzędu milisekund, jak i do szybkiego grawerowania za pomocą impulsów o czasie trwania kilku mikrosekund. Laser emituje promieniowanie na długości fali około 1065 nm. Maksymalna częstota emisji impulsów wynosi 250 kHz, minimalny czas ich trwania 2 μ s, a maksymalny 65 ms.

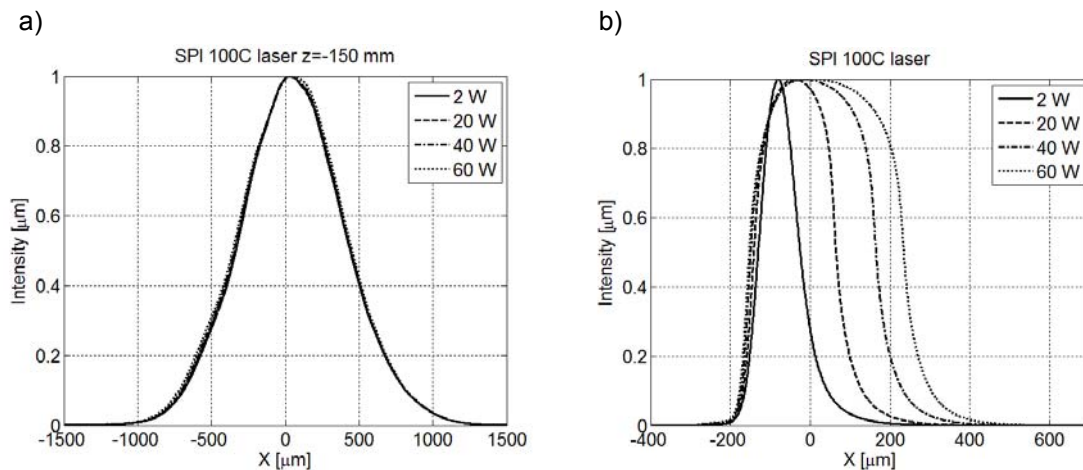
Na rysunku 4 zamieszczono przykładowe wykresy impulsów generowanych przez laser. Impulsy o czasie trwania powyżej 10 μ s na początku mają charakterystyczny pik (rys. 4a), krótsze impulsy mają kształt monotoniczny, jak pokazano na rysunku 4b.

Według danych producenta, laser emituje impulsy gaussowskie o wartości parametru $M^2 < 1.1$. Wykonano pomiary rozkładów gęstości mocy lasera pracującego w trybie mocy ciągłej. Ze względów bezpieczeństwa, pomiary ograniczono do mocy nie przekraczającej 60 W. Na rysunku 5 zamieszczono wykresy rozkładów gęstości mocy przy mocach 2, 20, 40 i 60 W. W odległości 150 mm przed płaszczyzną ogniskową rozkłady gęstości mocy są praktycznie identyczne, jednak w płaszczyźnie ogniskowej średnica wiązki zmienia się od 200 do 600 μ m, co powoduje wzrost wartości parametru M^2 od 1.5 do 3.9 (rys. 6). Jest to efekt charakterystyczny dla laserów włóknowych.

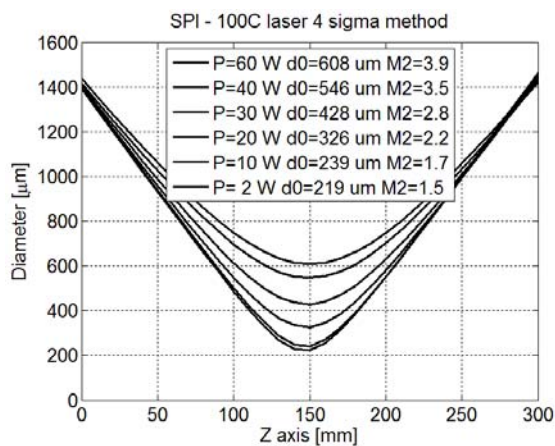


Rys. 4. Przykłady impulsów emitowanych przez laser SPI-100C:

- a) zadana moc 2 W, częstota generacji 5 kHz i czas trwania impulsu 100 μs ;
 b) zadana moc 10 W, częstota generacji 250 kHz i czas trwania 2 μs



Rys. 5. Rozkłady gęstości mocy w kierunku X dla lasera włóknowego SPI-100C dla mocy lasera 2, 20, 40 i 60 W: a) w odległości 150 mm przed płaszczyzną ogniskową; b) w płaszczyźnie ogniskowej



Rys. 6. Zależność średnicy wiązki lasera SPI-100C od położenia wzdłuż osi soczewki o długości ogniskowej $f = 500$ mm dla mocy lasera 2, 20, 40 i 60 W

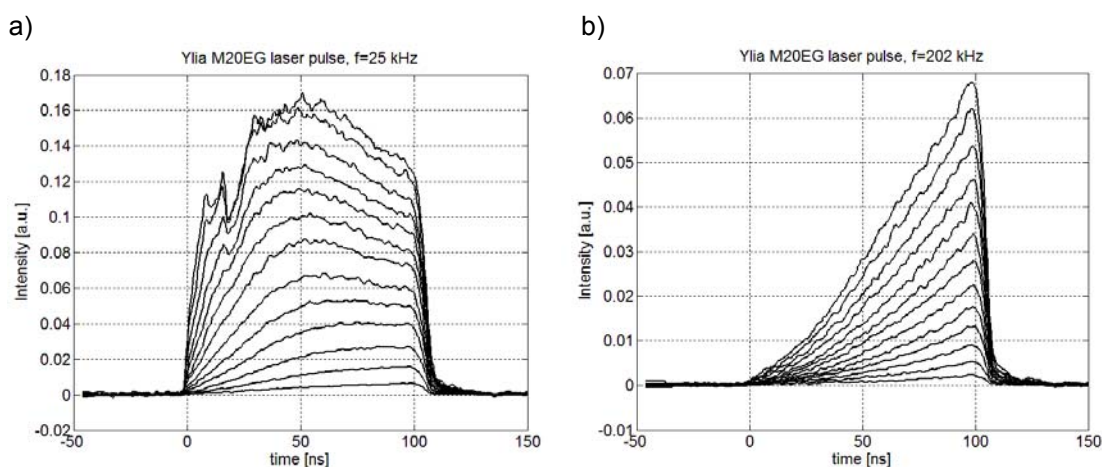
Producent deklaruje stałość mocy emitowanej wiązki z dokładnością 1%. Wykonano pomiary zależności mocy wiązki od czasu. Przy starannie wykonanych i ekranowanych połączeniach, amplituda fluktuacji mocy wokół wartości średniej wynosi 5% przy niskich mocach (poniżej 5 W), a przy wysokich jest zgodna z deklaracją producenta.

7. WŁÓKNOWY LASER IMPULSOWY YLIA M20EG

Laser Ylia M20EG został zaprojektowany jako źródło energii przeznaczone do zabudowania w urządzeniu służącym do obróbki materiałów w warunkach przemysłowych. Laser pracuje w trybie impulsowym i może służyć do spawania, cięcia, wiercenia otworów, szybkiego grawerowania i innych rodzajów obróbki materiałów.

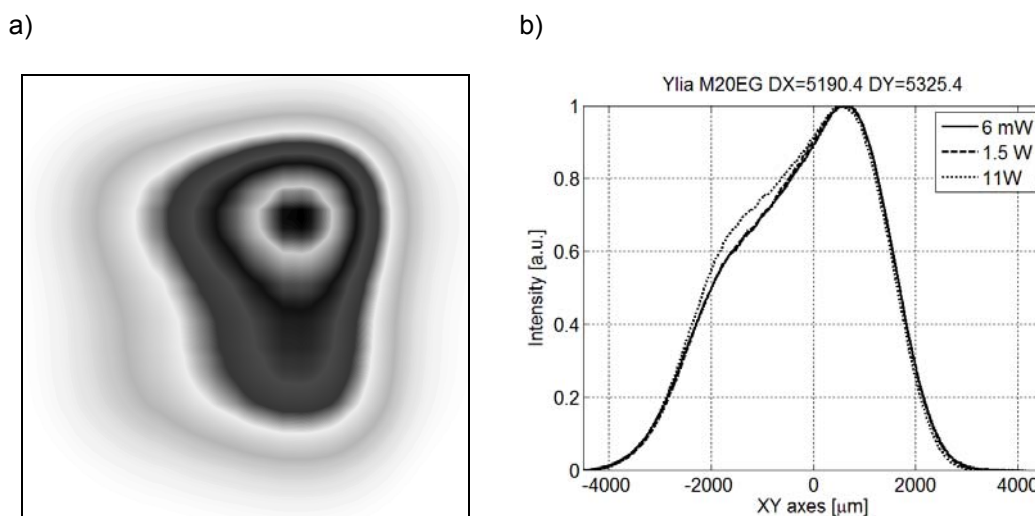
Laser generuje impulsy laserowe o czasie trwania około 110 ns z częstotliwością od 25 do 250 kHz. Moc średnią lasera można zmieniać 8-bitowym sygnałem cyfrowym od 100 mW do 20 W. Średnia energia impulsu zmienia się od 0.08 mJ przy częstotliwości 250 kHz do 0.8 mJ przy częstotliwości 25 kHz. Laser emituje wiązkę o niesymetrycznym rozkładzie gęstości mocy w przekroju poprzecznym, co było głównym powodem do badania jego charakterystyk. Średnica emitowanej wiązki wynosi około 12 mm.

Na rysunku 7 zamieszczono przykłady czasowych kształtów impulsów przy częstotliwości 25 i 202 kHz. Przy częstotliwości 25 kHz i dużych mocach, laser generuje impulsy prawie prostokątne. Przy wysokich częstotliwościach impulsy mają kształt trójkątny.

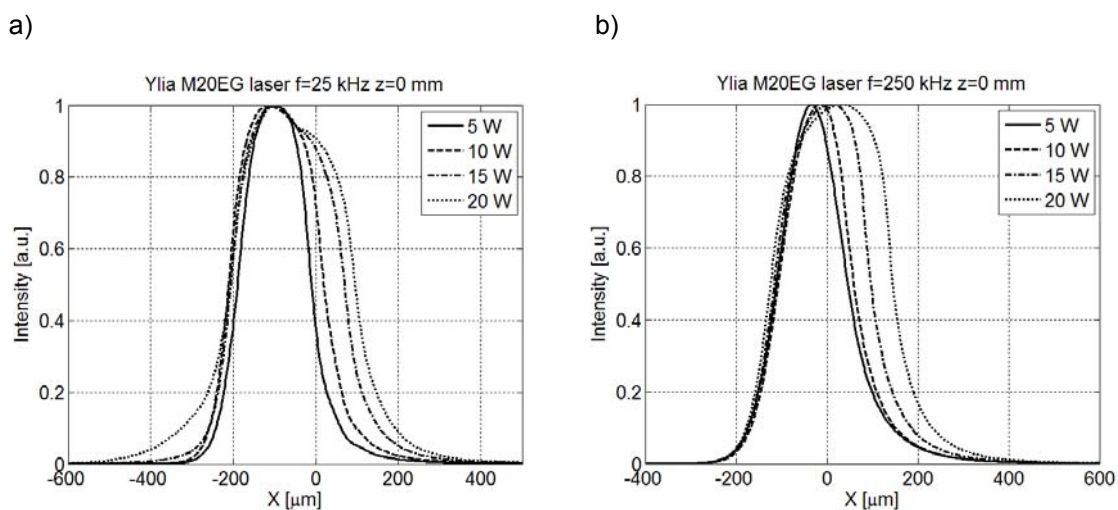


Rys. 7. Impulsy laserowe generowane przez laser Ylia M20EG przy różnych mocach i częstotliwościach. Częstość generacji impulsów: a) 25 kHz; b) 202 kHz. Kształty impulsów odpowiadają cyfrowym nastawom mocy 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240 i 255

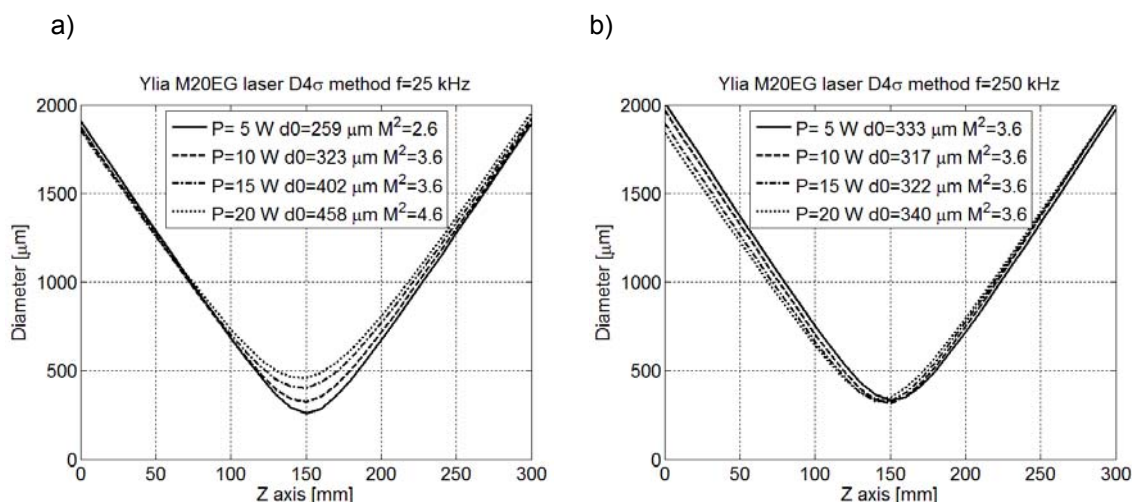
Na rysunku 8 zamieszczono rozkłady gęstości mocy w odległości około 150 mm przed płaszczyzną ogniskową soczewki o długości ogniskowej 500 mm. Jak wynika z rysunku 8, rozkłady te praktycznie nie zależą od mocy lasera. W dużej odległości (kilkakrotnie większej niż zasięg Rayleigha) od płaszczyzny ogniskowej rozkłady te nie zależały ani od częstotliwości generacji impulsów, ani od mocy lasera.



Rys. 8. Rozkłady gęstości mocy w wiązce lasera Ylia M20EG przy różnych mocach i częstotliwości 25 kHz: a) rozkład w skali odcieni szarości; b) rozkład w przekroju Y (pionowym), dla mocy 0.06, 1.5 i 11 W



Rys. 9. Rozkłady gęstości mocy w wiązce lasera Ylia M20EG przy różnych mocach w płaszczyźnie ogniskowej: a) rozkład dla częstotliwości generacji 25 kHz; b) 250 kHz



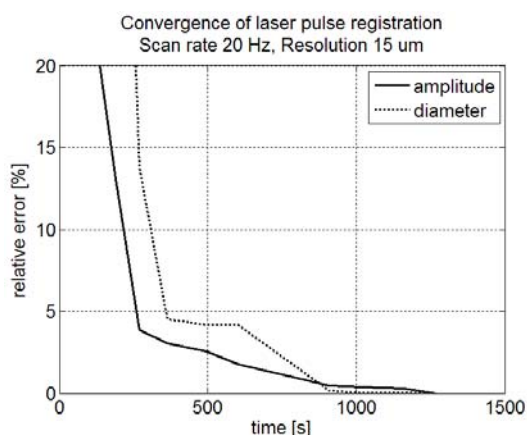
Rys. 10. Zależność średnicy wiązki lasera Ylia M20EG od położenia wzdłuż osi soczewki o długości ogniskowej $f = 500$ mm dla mocy lasera 5, 10, 15 i 20 W: a) częstota 25 kHz; b) 250 kHz

Na rysunku 9 zamieszczono wykresy rozkładów gęstości mocy w płaszczyźnie ogniskowej dla częstotliwości 25 i 250 kHz. Średnica wiązki zależy od jej mocy, co powoduje, że parametr M^2 dla częstotliwości 25 kHz zmienia swoją wartość od 2.6 do 4.6. Dla częstotliwości 250 kHz wartość parametru M^2 nie zależy od mocy i przyjmuje stałą wartość 3.6 (rys. 10). Przy mocy poniżej 1 W wartość parametru M^2 przyjęła deklarowaną przez producenta lasera wartość 2.2. W zastosowaniach praktycznych, gdy moc lasera będzie przyjmować wartości od 5 do 20 W, wartość parametru M^2 będzie się mieścić w zakresie 3-4.

8. LASER PIKOSEKUNDOWY 532 nm

Laser pikosekundowy generuje impulsy laserowe ze stałą częstotliwością 1 kHz o czasie trwania 70 ps. Na pierwszej harmonicznej o długości fali 1064 nm energia impulsu wynosi 3 mJ, na drugiej 532 nm około 2 mJ, na trzeciej 355 nm około 1 mJ, na czwartej 266 nm około 0.5 mJ. Producent deklaruje wartość parametru M^2 poniżej 1.1.

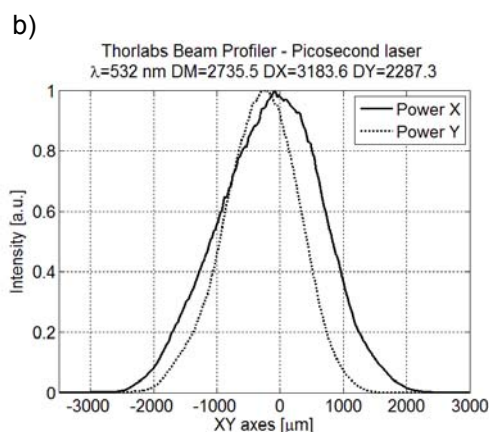
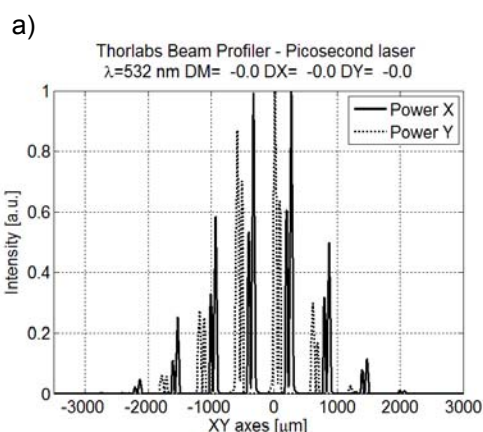
Podjęto próbę pomiaru charakterystyk tego lasera. Okazało się to jednak zadaniem niewykonalnym, gdyż zastosowany analizator praktycznie nie nadaje się do rejestrowania rozkładów gęstości mocy laserów o tak małej częstotliwości generacji. Rejestracja jednego rozkładu trwała od 15 do 60 minut, zależnie od



Rys. 11. Zależność od czasu błędu rejestracji rozkładu gęstości mocy lasera o częstotliwości 1 kHz

ustawień analizatora. Na rysunku 11 zamieszczono wykres ilustrujący szybkość zbieżności procesu rejestracji. Wykreślono na nim różnicę między rozkładem uzyskanym w danej chwili a rozkładem po zakończeniu procesu rejestracji. Przy ustawieniu większej rozdzielczości czas rejestracji staje się jeszcze dłuższy.

Badania rozkładów gęstości mocy laserów impulsowych powinny być wykonywane za pomocą kamer CCD.



c)

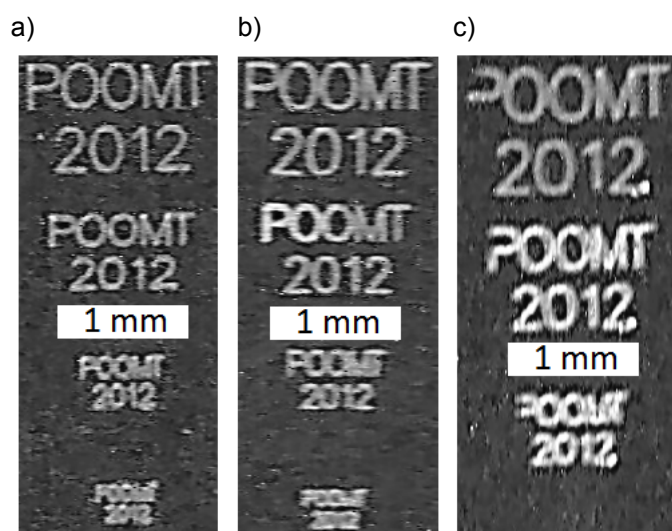


Rys. 12. Rozkłady gęstości mocy lasera o częstotliwości 1 kHz: a) po 3 minutach rejestracji, b) po 40 minutach, c) w skali odcieni szarości po 40 minutach rejestracji

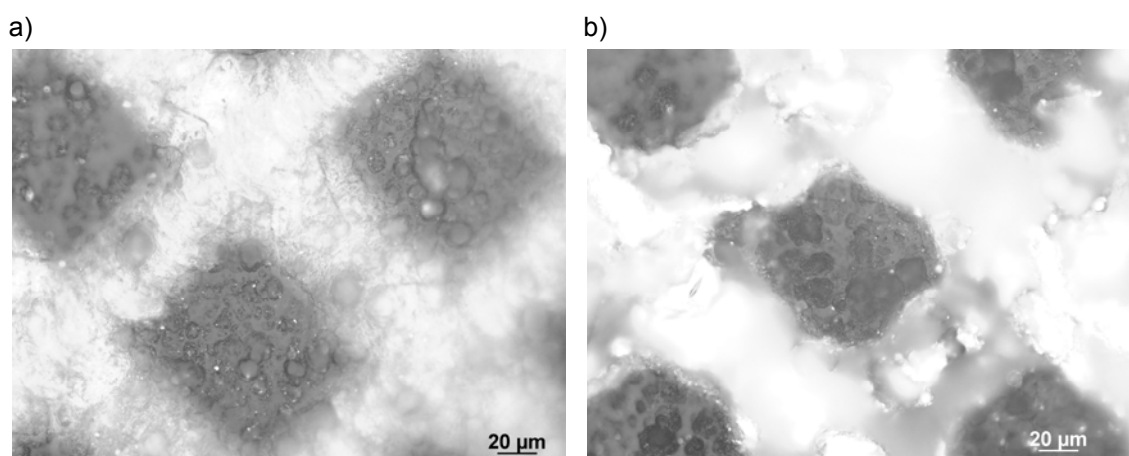
9. ZASTOSOWANIA PRAKTYCZNE

Badania charakterystyk lasera są wykorzystywane przy próbach grawerowania lub znakowania mikroskopijnych obiektów, np. trudnych do zauważenia sekretnych oznakowań. Wyniki pomiarów pozwalają przewidzieć

wymiary najmniejszych obiektów, które można oznakować danym laserem. Wszystkie badane lasery miały jedną wspólną cechę: średnica wiązki w przewężeniu była nie mniejsza niż 0.1 mm. To ogranicza możliwość wytwarzania znaków o wymiarach poniżej 0.2 mm. Na rysunku 13 przedstawiono przykład znakowania tekstu „POMMT 2012” za pomocą omawianych laserów. Najlepsze efekty uzyskano w przypadku lasera Ylia. Nieco mniejsza rozdzielczość wystąpiła w przypadku lasera SPI. W przypadku lasera pikosekundowego rozdzielczość jest najgorsza, ponadto wskutek wydłużenia ogniskowej nastąpiło powiększenie wymiarów znakowanych obiektów. Jednak w tym przypadku rozdzielczość można łatwo poprawić nawet czterokrotnie za pomocą teleskopu powiększającego wiązkę.



Rys. 13. Przykład znakowania miniatury tekstów za pomocą laserów:
a) laser Ylia M20EG, b) laser SPI-100C, c) laser pikosekundowy



Rys. 14. Przykład grawerowania skrzyżowanych linii za pomocą lasera SPI:
a) niska moc, płytkie grawerowanie, chropowatość niewyczuwalna; b) parametry obróbki zoptymalizowane na głębokie grawerowanie, próbka silnie chropowata

Za pomocą lasera SPI przy dobrze dobranych parametrach obróbki można grawerować linie o szerokości około 50 μm (rys. 14). Grawerowanie lub znakowanie jeszcze mniejszych obiektów wymaga poprawy jakości wiązki metodą filtracji przestrzennej [4].

Jakość wiązki omawianych laserów jest wystarczająca do większości niezbyt wyrafinowanych metod obróbki laserowej, takich jak znakowanie, zdobienie czy grawerowanie.

Praca została wykonana w ramach projektu POIG.02.01.00-14-095/09-00, OPTOLAB: Rozbudowa bazy laboratoryjnej Instytutu Optoelektroniki WAT.

LITERATURA

1. Józwicki R.: Technika laserowa i jej zastosowania, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2009.
2. M^2 factor, http://www.rp-photonics.com/m2_factor.html.
3. Roundy C.: Propagation factor quantifies laser beam performance, Laser Focus World, December, 1999.
4. Sarzyński A.: Badanie wpływu elementów optycznych na propagację promieniowania w układzie laserowym dużej mocy, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa, 1991.
5. ISO Standard 11146, Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios, 2005.
6. Thorlabs, Optical Slit Beam Profiler – Operation Manual, Part V M^2 Measurements.

MEASUREMENTS OF CHARACTERISTICS
OF LASER BEAMS
APPLIED IN PROCESSING OF MATERIALS

Antoni SARZYŃSKI

ABSTRACT *The results of measurements of characteristics of laser beams applied in processing of materials are described in the paper. The scheme of experimental setup is described. The specific properties of Gaussian laser beams are posted. The procedure for determination of laser beam quality parameter, the so called M^2 parameter is discussed. The laws of similarity of beams focused by different lenses are included. Distributions of energy density in the beam cross-section, temporal pulse shape, stability of laser power versus time were measured. The M^2 parameter was calculated. The measurements were performed for He-Ne, fiber CW SPI-100C, pulsed Ylia M20EG and picosecond lasers. Some examples of factors influencing measurements errors are listed. Some examples of laser marking process are provided.*

Keywords: *laser pulse, M^2 parameter, Gaussian beam, similarity laws for focusing systems*

