

Mateusz, Robert Barbucha, Marek Kocik

Instytut Maszyn Przepływowych im. R. Szewalskiego PAN w Gdańsku

Jerzy Mizeraczyk

Akademia Morska w Gdyni

Nikola V. Sabotinov, Todor Petrov

Institute of Solid State Physics

Bulgarian Academy of Sciences, Sofia

OBRAZOWANIE PLAZMY ABLACYJNEJ GENEROWANEJ NANOSEKUNDOWYMI IMPULSAMI LASEROWYMI ZA POMOCĄ KAMERY ICCD Z SZYBKĄ MIGAWKĄ OPTOELEKTRONICZNĄ

W artykule przedstawiono wyniki obrazowania plazmy ablacyjnej generowanej nanosekundowym impulsem laserowym z powierzchni metalowej próbki oraz wyniki obrazowania fali dźwiękowej powstającej podczas rozszerzania się plazmy ablacyjnej. Obrazowanie polegało na wykonaniu serii zdjęć plazmy ablacyjnej i fali dźwiękowej w wysokiej rozdzielczości czasowej, przedstawiających ich ewolucję w czasie. Z analizy otrzymanych zdjęć wynika, że początkowa prędkość rozszerzającej się plazmy ablacyjnej wynosi od $6 \cdot 10^3$ do $7 \cdot 10^3$ m/s w zależności od gęstości energii promieniowania laserowego na powierzchni próbki. Prędkość początkowa fali dźwiękowej także uzależniona jest od gęstości energii promieniowania laserowego.

WPROWADZENIE

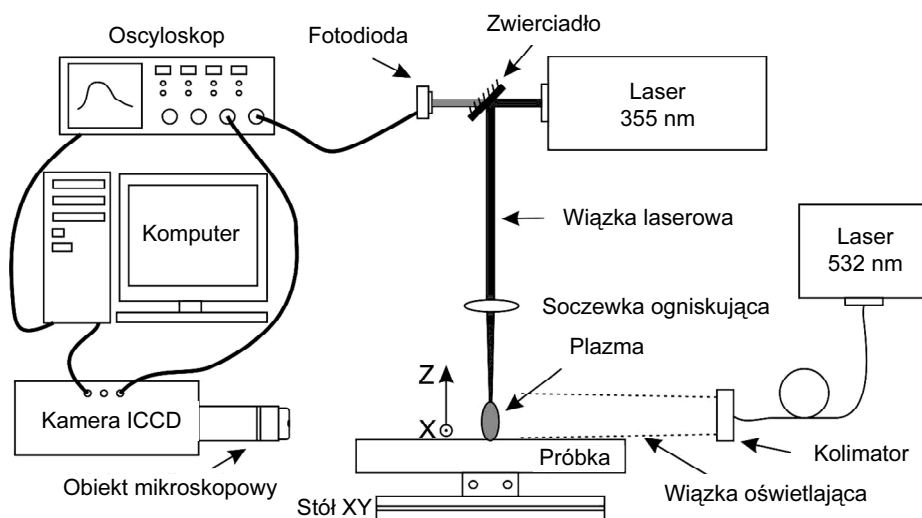
Nanosekundowa ablacja laserowa ma wiele zastosowań praktycznych, takich jak: mikroobróbka laserowa, laserowa depozycja (PLD), tworzenie nanocząstek, próbkowanie materiałów do analizy spektroskopowej (LIBS) i inne [1, 5, 8]. Podczas oddziaływania nanosekundowego impulsu laserowego z powierzchnią próbki może dojść do wyrwania z jej powierzchni niewielkiej ilości materiału w wyniku lokalnego wzrostu temperatury i ciśnienia. Oderwany od próbki, silnie zjonizowany materiał tworzy nad miejscem oddziaływania wiązki laserowej rozszerzający się obłok plazmy ablacyjnej. W mechanizmie powstawania i rozszerzania się plazmy ablacyjnej biorą udział takie zjawiska, jak: hamowanie plazmy w atmosferze gazowej, tworzenie fali uderzeniowej, rekombinacja jonów i inne [3, 6]. Jednak mechanizm ten nie jest w pełni poznany.

Aby lepiej poznać mechanizm powstawania i rozszerzania się plazmy ablacyjnej, wykonano obrazowanie plazmy oraz obrazowanie fali dźwiękowej powstającej podczas rozszerzania się plazmy ablacyjnej. Plazmę ablacyjną wzbudzano

z powierzchni metalowej próbki za pomocą impulsów lasera nadfioletowego na ciełe stałym o czasie trwania impulsu 55 ns. Obrazowanie polegało na wykonaniu, w krótkich odstępach czasu, serii zdjęć przedstawiających ewolucję plazmy ablacyjnej oraz ewolucję fali dźwiękowej. Zdjęcia wykonano za pomocą kamery ICCD (*Intensified CCD*) z szybką migawką optoelektroniczną o minimalnym czasie ekspozycji wynoszącym 2 ns.

1. STANOWISKO POMIAROWE

Stanowisko pomiarowe do obrazowania plazmy ablacyjnej i fali dźwiękowej przedstawiono na rysunku 1. Składa się ono z układu do generowania plazmy ablacyjnej za pomocą nanosekundowych impulsów laserowych oraz układu do obrazowania wykorzystującego kamerę ICCD (*Intensified CCD*).



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe do obrazowania plazmy ablacyjnej i fali dźwiękowej
Fig. 1. Measurement station for the visualization of the ablation plasma and soundwave

Głównymi elementami układu do generowania plazmy ablacyjnej są:

- laser nadfioletowy (laser na ciełe stałym Nd:YVO z generacją trzeciej harmonicznej, długość fali $\lambda = 355$ nm, maksymalna moc średnia $P = 6$ W, czas trwania impulsu laserowego $\tau = 55$ ns, częstotliwość repetycji impulsów laserowych $f = 28$ kHz);
- układ optyczny prowadzący i ogniskujący wiązkę laserową (ogniskowa $f = 100$ mm);
- ruchomy stół XY, na którym umieszczona jest metalowa próbka.

Metalowa próbka, z której wzbudzona jest plazma ablacyjna, wykonana jest ze stali nierdzewnej 304 o grubości 200 μm . Wiązka laserowa kierowana jest od lasera wzdłuż osi Z i ogniskowana na powierzchni metalowej próbki do średnicy $d = 20 \mu\text{m}$. Podczas badań pojedynczy impuls laserowy zogniskowany na powierzchni próbki generuje nad jej powierzchnią plazmę ablacyjną o wysokości kilkuset mikrometrów. Po każdym impulsie laserowym stół XY przesuwa próbkę tak, by uniknąć wzbudzania plazmy ablacyjnej wielokrotnie z tego samego punktu na powierzchni próbki.

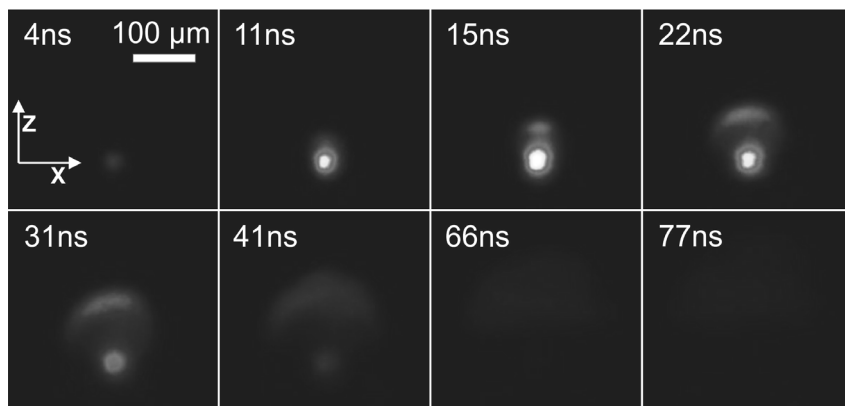
Głównymi elementami układu do obrazowania są: kamera ICCD, układ synchronizująco-opóźniający i laser impulsowy emitujący wiązkę oświetlającą. Kamera ICCD wyposażona jest w obiektyw mikroskopowy oraz zestaw filtrów szarych. Obiektyw mikroskopowy umożliwia obserwację niewielkiej plazmy ablacyjnej w dużej rozdzielczości, natomiast zestaw filtrów zapobiega uszkodzeniu kamery na skutek zbyt dużego natężenia promieniowania plazmy. Kamera ICCD ustawiona jest tak, by obserwować obszar powstawania plazmy ablacyjnej z boku (wzdłuż osi Y).

Do obrazowania plazmy ablacyjnej wykorzystano metodę bezpośredniej obserwacji, do obrazowania fali dźwiękowej zaś – metodę fotografii cieniowej [2]. Metoda bezpośredniej obserwacji polega na rejestrowaniu przez kamerę ICCD promieniowania emitowanego przez plazmę ablacyjną. Podczas obrazowania plazmy ablacyjnej czas ekspozycji kamery ICCD był stały i wynosił 2 ns. Migawka kamery wyzwana jest sygnałem z układu synchronizująco-opóźniającego. Układ ten umożliwia wyzwolenie migawki kamery w zadanym momencie po impulsie laserowym wzbudzającym plazmę ablacyjną. Dzięki temu możliwe jest wykonanie serii zdjęć przedstawiających ewolucję plazmy ablacyjnej w czasie. W metodzie fotografii cieniowej zastosowanej do obrazowania fali dźwiękowej, impulsowa laserowa wiązka oświetlająca kierowana jest w obszar powstawania fali dźwiękowej, a następnie do obiektywu kamery ICCD. Rozchodząca się w powietrzu fala dźwiękowa powoduje lokalną zmianę współczynnika załamania światła, co widoczne jest na rejestrowanym przez kamerę obrazie. W tej metodzie migawka kamery ICCD jest otwarta przez 2 μs od rozpoczęcia impulsu laserowego generującego plazmę. Układ synchronizująco-opóźniający wyzwala krótki impuls oświetlający (czas trwania impulsu $t = 15 \text{ ns}$) rejestrowany przez kamerę. Umożliwia to wykonanie serii zdjęć przedstawiających zmianę współczynnika załamania światła, spowodowaną rozchodzącą się falą dźwiękową.

Wszystkie pomiary wykonano w warunkach standardowych ($T = 25^\circ\text{C}$, $P = 1 \text{ atm.}$)

2. WYNIKI

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe zdjęcia ukazujące ewolucję plazmy ablacyjnej (od 4 do 77 ns od rozpoczęcia impulsu laserowego). Metalowa próbka znajduje się na dole zdjęcia (na osi X), a wiązka laserowa pada na jej powierzchnię z góry (wzdłuż osi Z).



Rys. 2. Zdjęcia przedstawiające ewolucję plazmy ablacyjnej rozszerzającej się w powietrzu. Wykonano je za pomocą kamery ICCD (czas ekspozycji 2 ns).

Czas trwania impulsu laserowego $\tau = 55$ ns, gęstość energii promieniowania laserowego na powierzchni próbki 52 J/cm^2

Fig. 2. Images of the ablation plasma plume expanding in the ambient air. Images were captured using ICCD camera (exposure time 2 ns). Laser pulse width $\tau = 55$ ns, laser fluence on the target surface 52 J/cm^2

Przedstawione na rysunku 2 zdjęcia ukazują, że plazma ablacyjna pojawia się już na samym początku impulsu laserowego w postaci gorącego punktu na powierzchni metalowej próbki. Następnie plazma rozszerza się półsferycznie, co spowodowane jest różnicą ciśnień pomiędzy obszarem oddziaływania wiązki laserowej a otaczającym powietrzem. Pod koniec impulsu laserowego (w okolicach $\tau = 60$ ns) obłok plazmy jest już w pełni rozwinięty i zaczyna zanikać, aż do osiągnięcia progu detekcji kamery ICCD (około $\tau = 77$ ns).

Wykonano serię zdjęć przedstawiających ewolucję plazmy ablacyjnej dla pięciu wartości gęstości energii promieniowania laserowego na powierzchni metalowej próbki. Na zdjęciach znaleziono położenie frontu plazmy ablacyjnej wzdłuż osi Z.

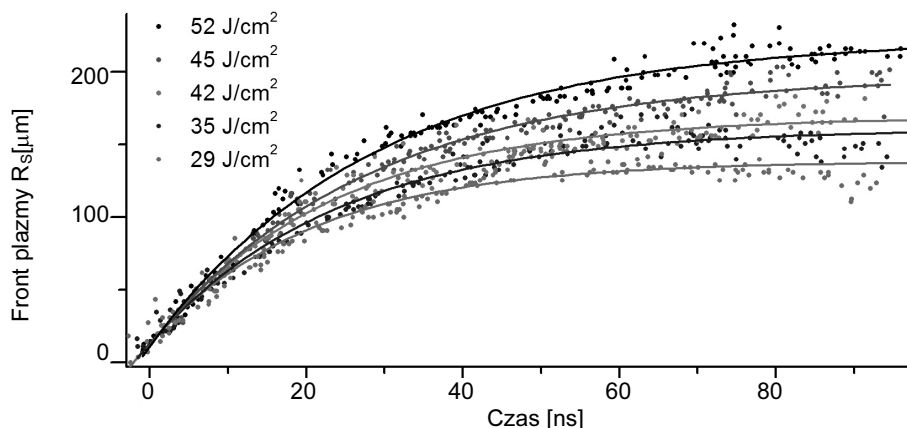
Wyniki przedstawiono na rysunku 3.

Zazwyczaj ewolucję plazmy ablacyjnej opisuje się za pomocą modelu hamowania (*drag model*) [4]. W modelu tym front plazmy ablacyjnej propaguje z dużą prędkością na początku trwania impulsu laserowego i zwalnia, z czasem osiągając w końcu swój limit ekspansji (*stopping distance*). Hamowanie frontu plazmy spowodowane jest obecnością powietrza, które wytwarza siłę oporu dla cząsteczek i jonów plazmy. W modelu hamowania położenie frontu plazmy ablacyjnej w czasie opisane jest wzorem:

$$R_s = R_{\max} (1 - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

gdzie:

$R_{\max}$ – limit ekspansji frontu plazmy,
 β – współczynnik hamowania.



Rys. 3. Położenie frontu plazmy ablacyjnej dla pięciu wartości gęstości energii promieniowania laserowego na powierzchni próbki

Fig. 3. Position on the plasma plume front for five values of laser fluence on the target surface

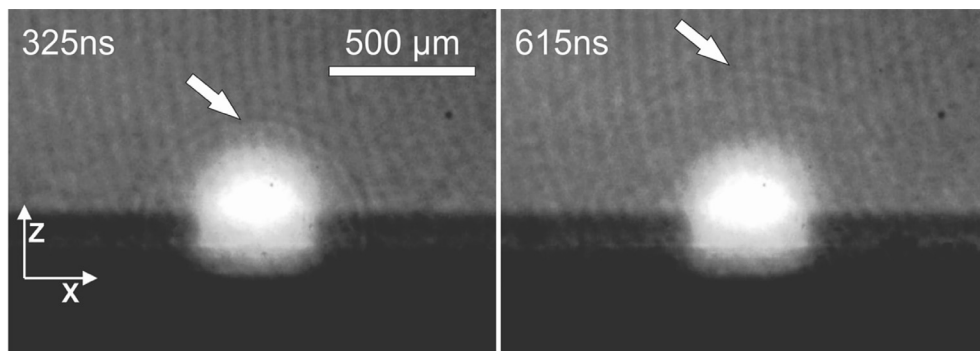
Wyniki pomiarowe położenia frontu plazmy ablacyjnej (rys. 3) aproksymowano zgodnie z modelem hamowania wzorem (1). Z rysunku 3 zauważyć można, że przewidywania kształtu krzywej są zgodne z wynikami pomiarowymi. Limit ekspansji frontu plazmy R_{max} rośnie ze wzrostem gęstości energii promieniowania laserowego od 125 μm dla 29 J/cm² do 210 μm dla 52 J/cm². Prędkość początkowa frontu plazmy także zwiększa się ze wzrostem gęstości energii od $6 \cdot 10^3$ m/s dla 29 J/cm² do $7 \cdot 10^3$ m/s dla 52 J/cm². Podobne wyniki pomiaru prędkości frontu plazmy uzyskał Zheng i inni [7], którzy badali mechanizm powstawania plazmy ablacyjnej wzbudzonej z próbki krzemowej za pomocą nadfioletowego impulsu laserowego o czasie trwania 5 ns. Prędkość początkową plazmy oszacowali oni na $7,9 \cdot 10^3$ m/s dla gęstości energii promieniowania laserowego 11 J/cm².

Ponieważ plazma ablacyjna rozszerza się w powietrzu z naddźwiękową prędkością, towarzyszy jej powstanie fali uderzeniowej. Rozprzestrzeniająca się w powietrzu fala uderzeniowa zwalnia do prędkości dźwięku.

Na rysunku 4 przedstawiono falę dźwiękową zarejestrowaną metodą fotografii cieniowej. Metalowa próbka znajduje się na dole zdjęcia, natomiast wiązka laserowa pada prostopadłe z góry. Migawka kamery ICCD otwarta była przez 2 μs od rozpoczęcia impulsu laserowego, dlatego na zdjęciu poza falą uderzeniową zarejestrowano także promieniowanie plazmy ablacyjnej. Wykonane zdjęcia pokazują, że w badanym czasie fala dźwiękowa powiększa się o półsfery.

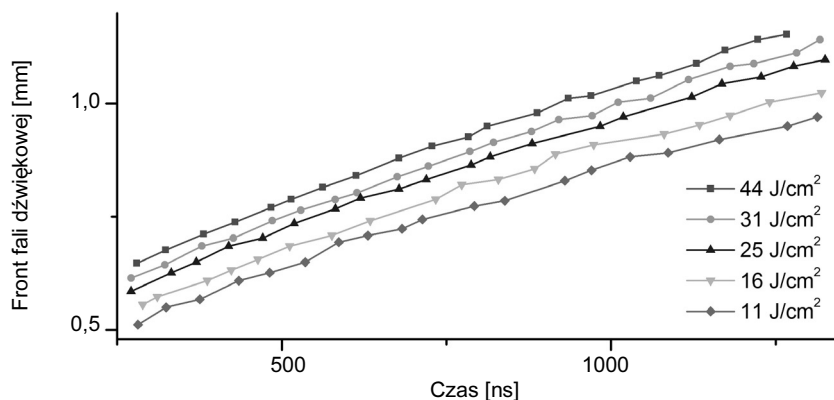
Wykonano serię zdjęć przedstawiających ewolucję fali dźwiękowej dla różnych wartości gęstości energii promieniowania laserowego generującego plazmę ablacyjną. Dla wykonanych zdjęć wyznaczono położenie frontu fali dźwiękowej wzdłuż osi Z.

Wyniki przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 4. Zdjęcia fali dźwiękowej powstającej podczas rozszerzania się plazmy ablacyjnej wykonane metodą fotografii cieniowej

Fig. 4. Images of the soundwave generated by expanding plasma plume captured using shadowgraphy method



Rys. 5. Położenie frontu fali dźwiękowej powstającej podczas ekspansji plazmy ablacyjnej dla pięciu wartości gęstości energii promieniowania laserowego na powierzchni próbki

Fig. 5. Position of the ablation soundwave front for the five values of the laser fluence on the target surface

Z rysunku 5 wynika, że dla stałego czasu front fali dźwiękowej jest dalej dla większych wartości gęstości energii promieniowania laserowego. Spowodowane jest to tym, że prędkość początkowa fali uderzeniowej powstającej podczas ekspansji plazmy ablacyjnej rośnie ze wzrostem gęstości energii promieniowania laserowego (rys. 3). Jednocześnie dla badanego czasu, tj. od 250 do 1250 ns, fala uderzeniowa spowolniła już do prędkości dźwięku i jej prędkość jest podobna dla wszystkich pięciu serii pomiarowych i wynosi około 350 ± 10 m/s.

PODSUMOWANIE

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki obrazowania plazmy ablacyjnej generowanej nanosekundowym impulsem laserowym oraz wyniki obrazowania fali dźwiękowej powstającej podczas rozszerzania się plazmy. Obrazowanie wykonano za pomocą kamery ICCD z szybką migawką optoelektroniczną. Na podstawie wykonanych zdjęć zmierzono położenie frontu plazmy ablacyjnej oraz frontu fali dźwiękowej w czasie. Prędkość początkowa oraz wielkość plazmy ablacyjnej rosły ze wzrostem gęstości energii promieniowania laserowego na powierzchni próbki. Prędkość początkowa fali uderzeniowej także rosła ze wzrostem gęstości promieniowania laserowego.

Wyniki przeprowadzonych pomiarów można wykorzystać praktycznie, np. do optymalizacji procesu laserowej mikroobróbki materiałów. Podczas mikroobróbki zazwyczaj dąży się do tego, aby gęstość energii promieniowania laserowego na powierzchni próbki była jak największa. W wielu aplikacjach precyzyjne zogniskowanie wiązki laserowej jest trudne. Dlatego aby zogniskować wiązkę laserową, można wykorzystać właściwości fali dźwiękowej, powstającej podczas rozszerzania się plazmy ablacyjnej, której prędkość początkowa zwiększa się wraz ze wzrostem gęstości energii promieniowania laserowego. Falę dźwiękową rejestrować można za pomocą mikrofonu akustycznego. Optymalne warunki zogniskowania uzyskać można, minimalizując opóźnienie, po którym zarejestrowano falę dźwiękową.

Praca badawcza realizowana w ramach projektu systemowego „InnoDoktorant – stypendia dla doktorantów, IV edycja”. Projekt jest współfinansowany przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Społecznego (Program Operacyjny Kapitał Ludzki, Priorytet VIII, Działanie 8.2, Poddziałanie 8.2.2: „Regionalne Strategie Innowacji”).



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



SAMORZĄD
WOJEWÓDZTWA POMORSKIEGO

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



LITERATURA

1. Amoruso S., Toftmann B., Schou J., Velotta R., Wanga X., *Diagnostics of laser ablated plasma plumes*, Thin Solid Films, Vol. 453–454, 2004, s. 562–572.
2. Hauer M., Funk D.J., Lippert T., Wokaun A., *Time-resolved techniques as probes for the laser ablation process*, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 43, 2005, s. 545–556.
3. Jedynski M., Hoffman J., Mroz W., Szymanski Z., *Plasma plume induced during ArF laser ablation of hydroxyapatite*, Applied Surface Science, Vol. 255, 2008, s. 2230–2236.

4. Misra A., Thareja R. K., *Investigation of laser ablated plumes using fast photography*, IEEE Transactions Plasma Science, Vol. 27, 1999, s. 1553–1558.
5. Porneala C., Willis D.A., *Time-resolved dynamics of nanosecond laser-induced phase explosion*, Journal Physics D, Vol. 42, 2009, s. 155503–155510.
6. Toftmann B., Schou J., *Dynamics of the plume produced by nanosecond ultraviolet laser ablation of metals*, Physical Review B, Vol. 67, 2003.
7. Zeng X., Mao X., Grief R., Russo R.E., *Ultraviolet femtosecond and nanosecond laser ablation of silicon: ablation efficiency and laser-induced plasma expansion*, Proc. SPIE, 5448, 2004, s. 1150–1158.
8. Zhang Z., Gogos G., *Effects of laser intensity and ambient conditions on the laser-induced plume*, Applied Surface Science, Vol. 252, 2005, s. 1057–1064.

VISUALIZATION OF THE NANOSECOND LASER GENERATED ABLATION PLASMA USING ICCD CAMERA WITH OPTOELECTRONIC SHUTTER

Summary

In this paper we report the result of the visualization of the nanosecond laser generated ablation plasma and visualization of the sound wave created during plasma expansion. The visualization was done by capturing the series of time-resolved images of both plasma and sound wave. Using captured images the initial velocity of the plasma was found to vary from $6 \cdot 10^3$ m/s to $7 \cdot 10^3$ m/s depending on the laser fluence. The initial velocity of the sound wave also vary with laser fluence.