

平成21年 4月30日現在

研究種目：若手研究(スタートアップ)

研究期間：2007～2008

課題番号：19860090

研究課題名(和文) 高融点材料に対するプラズマとレーザー複合照射効果

研究課題名(英文) synergistic irradiation effects of laser pulses and plasmas to the materials with high melting point

研究代表者

梶田 信(KAJITA SHIN)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・講師

研究者番号：00455297

研究成果の概要：

ダイバータ模擬装置NAGDIS-II(名古屋大学)において、タングステンへのヘリウム照射を行った。He-NeレーザーとPin-Photodiodeを組み合わせ、*in situ*での反射率計測機器を構築し、プラズマ照射に伴うタングステンの反射率変化を調べた。ナノ秒レーザー及びサブミリ秒レーザーを用いたアブレーションを、高速カメラとフィルタを組み合わせたフィルタ分光法を用いて調べた。プラズマとレーザーの複合照射によりアブレーション閾値が著しく減少することが明らかになった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,290,000	0	1,290,000
2008年度	1,240,000	372,000	1,612,000
総計	2,530,000	372,000	2,902,000

研究分野：プラズマ材料相互作用

科研費の分科・細目：総合工学 核融合学

キーワード：ヘリウム損傷，金属ミラー，間欠的熱負荷，プラズマ照射，複合照射効果，核融合プラズマ，レーザーアブレーション

1. 研究開始当初の背景

金属材料(ここでは特に、タングステンやモリブデンなどの高融点材料を想定)はプラズマが照射されると、スパッタリング、不純物(炭素や鉄など)や中性子照射による損傷に加え、近年、ヘリウムプラズマ照射によりナノからサブ μm サイズのヘリウムホールや

バブルが形成されることが見いだされた。このヘリウム照射損傷を受けると光学的反射率や熱伝導率が著しく減少することが指摘され、核融合実験炉内に使用される金属ミラー材やプラズマ対向材料にとっては致命的な問題につながる可能性がある。特に問題となるのは、レーザー伝送用のミラーにおける

プラズマとレーザーの複合照射による損傷の進行であり、また、プラズマ損傷を受けたプラズマ対向材料における ELM(Edge Localized Mode)やディスラプション等、間欠的なイベントに伴う熱負荷による材料損傷の進行である。

申請者らは、これまで、タングステンにヘリウムプラズマを照射し、その損傷面へのパルスレーザー照射の効果を調べてきた。レーザー照射により表面状態が著しく変化するとともに、パルス幅等の条件により全く逆の効果が観測されたことから、プラズマとレーザーの相乗効果の重要性とその複雑さが示唆されている。タングステン材料とヘリウムプラズマという種類の組み合わせで、且つ限られたレーザーパワーの条件でしか実験を行うことができておらず、種々の実験条件においてミラー材にとって重要な反射率計測を含めた更なる実験が材料評価の上では重要となる。

2. 研究の目的

本研究ではプラズマとレーザー照射の相乗効果について、タングステンに加えミラー材として有望視されているモリブデンを照射材料として使用し、電子顕微鏡を用いた表面解析、光学的な反射率の計測（単波長で *in-situ*, 照射前後の波長依存性）と共に、アブレーション粒子からの発光を高速フィルタ分光により検出し、以下の項目について明らかにする。

(1) タングステン、モリブデンを照射試料として使用し、ヘリウムプラズマ照射時の光学的反射率のヘリウム照射量依存性を定量的に評価する。

(2) ヘリウム損傷を受けた材料（タングステン、モリブデン）に対してレーザーを照射し、レーザー照射に伴う反射率の変化（回復もしくは劣化）の特性を明らかにする。レーザーにはパルス幅の異なる YAG レーザー(Q-switch あり)とルビーレーザー(Q-switch なし)を用い、反射率の変化に与えるレーザーパワー密度の依存性を明らかにする。

(3) 材料表面に不純物（炭素、鉄等）を堆積させながら反射率を計測し、不純物付着による反射率の変化（低下）を評価する。

(4) 不純物付着表面にレーザー照射を行い、レーザー照射により反射率の変化（回復もしくは劣化）の特性（パワー密度の依存性）を明らかにすると共に、試料の表面解析を行うことによりレーザー照射が堆積膜に及ぼす影響を明らかにする。

(5) 上記のレーザー照射実験時には高速フィルタ分光を行い、損傷（ヘリウム損傷及び不純物付着による損傷）を受けた材料に対するアブレーションが発生する閾値を評価し、不純物のプラズマ中での輸送過程を解明する。

3. 研究の方法

本研究では、実験装置ダイバータ模擬装置 NAGDIS-II(名古屋大学)を用いる。直流放電により高密度で比較的低温度(電子密度 $\sim 10^{13}$ cm⁻³, 電子温度 ~ 5 eV)の円柱状のプラズマ(長さ ~ 2 m)が定常的に生成される。NAGDIS-II の試験領域に金属材料(タングステン or モリブデン)を設置しレーザーを照射する。レーザーには Q-switch を有する Nd:YAG レーザー(パルス幅 5 ns, 繰り返し周波数 10 Hz)及び Q-switch なしのルビーレーザー(パルス幅 0.5 ms, 繰り返し周波数 0.05 Hz)を用いる。

プラズマ照射時にはレーザーの反射光を計測し、反射率の経時変化を *in situ* でモニタリングすると共に、レーザー照射後の不純物からの発光を光学フィルタを介して高速カメラで計測することにより(高速フィルタ分光)、プラズマ中での不純物の挙動をモニタリングする。プラズマのみを照射する際には He-Ne レーザーを計測用ビームとして使用する。プラズマの電子密度、温度、空間電位は静電プローブで計測し、試料に対するイオン粒子束を評価する。照射前と照射後には試料を SEM(走査型電子顕微鏡)により表面解析すると共に、反射率の測定を行い、照射に伴う表面変化及び反射率の比較を行う。

4. 研究成果

ヘリウム照射損傷を受けたタングステンに対して、数 ns のパルス幅の YAG レーザーやパルス幅が 0.6 ms と長いルビーレーザーを照射し、照射後のタングステン原子線 W I($\lambda=400.9$ nm)とヘリウム原子線 He I(706.5 nm)の発光を高速カメラで計測し、さらに反射率の変化を計測した。タングステンに対し

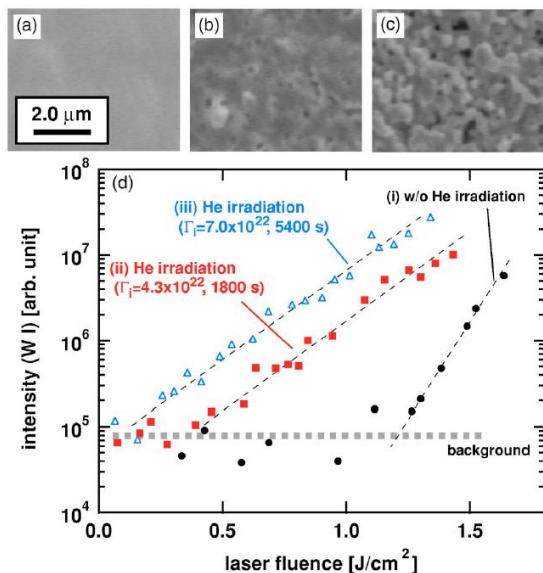


Fig. 1: (a) は水素プラズマ, (b)と(c)はヘリウム水素プラズマ照射後のタングステンのSEM画像. (d)タングステンの発光強度のレーザーパワー依存性.

て YAG レーザーを照射すると、損傷なしのタングステンではレーザーパワーが 1 J/cm^2 以下ではレーザーを照射しても発光が観測されないが、ヘリウム照射を行ったタングステンでは 0.2 J/cm^2 を超えるとレーザー照射に伴い発光が観測され、アブレーションのレーザーパワー閾値が著しく減少した。プラズマ照射に伴って、タングステン原子からの発光とともにヘリウム原子からの強い発光が観測された。熱伝導の3次元モデル計算により、熱負荷に伴いホール上部の温度が局所的に上昇し、ホールが爆発している可能性が示されており、本条

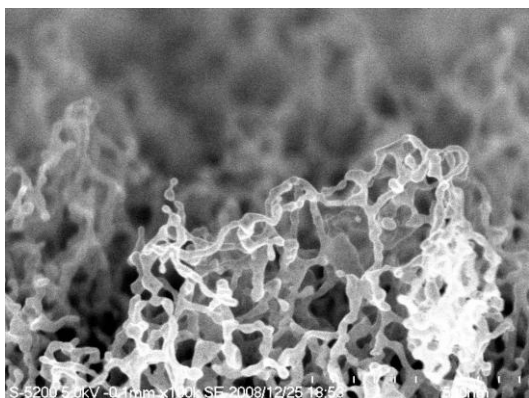


Fig. 2: 繊維状ナノ構造のSEM画像。

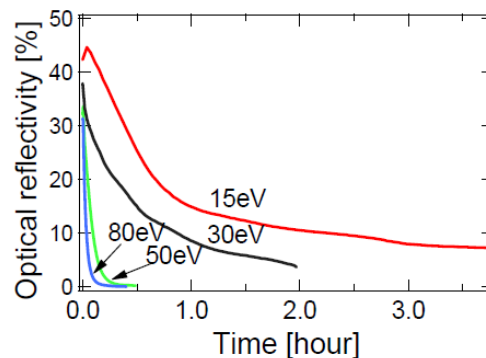


Fig. 3:ヘリウムプラズマ照射中の光学反射率. 横軸はプラズマ照射時間である. 入射イオンエネルギーを変化させて実験を行った。

件でも、レーザー照射によってヘリウムホール・バブルの破裂が起こり、アブレーション閾値の減少を生む原因となっていると考えられる。

Figure 2 にヘリウム照射により形成されたナノ構造のSEM画像を示す。ナノ構造は幅が数十 nm の棒が絡まりあった構造をしている。EDX 分析により、ナノ構造はタングステンのみで構成されていることが確認された。ナノ構造が形成されると、その複雑な表面形状のため光学反射率が著しく減少し約0%になる。よって、光学反射率がナノ構造形成の指標として利用できる。そこで、ヘリウムプラズマ照射中の試料の He-Ne レーザーを用いた in-situ での光学反射率計測を行い、照射後、試料の SEM による表面観察を行った。入射イオンエネルギーと試料温度を変化させ、反射率の計測を行った。Figure 3 にヘリウムプラズマ照射中の光学的反射率の変化を示す。入射イオンエネルギーを上昇させると反射率の低下時間が著しく減少することが明らかになった。入射イオンエネルギーが 15 eV のときは、バブル・ホールが形成されていたが、 50 eV のときは繊維状ナノ構造が形成された。より詳細な実験より、ナノ構造形成に必要な条件は試料温度が約 $1000\text{--}2000 \text{ K}$ であり、入射ヘリウムイオンエネルギーが約 30 eV 以上であることが明らかになった。SEM の観察により、 1000 K から 2000 K に試料温度が変化する間にナノ構造の幅が 30 nm から 500 nm に太くなることが分かった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5件)

- ① Shin Kajita, Wataru Sakaguchi, Noriyasu Ohno, “*Formation and mitigation of fiberform nanostructured tungsten by helium and sub-ms laser pulse irradiations*”, Plasma Devices and Operations (*in press*). 査読あり
- ② Wataru Sakaguchi, Shin Kajita, Noriyasu Ohno, Makoto Takagi “*In situ reflectivity of tungsten mirrors under helium plasma exposure*” Journal of Nuclear Materials (*in press*). 査読あり
- ③ Shin Kajita, Shuichi Takamura, Noriyasu Ohno, “*Prompt ignition of a unipolar arc on helium irradiated tungsten*”, Nuclear Fusion, Vol. 49 (2009) 032002 (4 pp). 査読あり
- ④ Shin Kajita, Noriyasu Ohno, Wataru Sakaguchi, Makoto Takagi, “*Visualized Blow-off from helium irradiated tungsten in response to ELM-like heat load*”, Plasma and Fusion Research Vol. 4 (2009) 004 (6 pp). 査読あり
- ⑤ Shin Kajita, Noriyasu Ohno, Shuichi Takamura, Wataru Sakaguchi, Dai Nishijima, “*Plasma-assisted laser ablation of tungsten: Reduction in ablation power threshold due to bursting of holes/bubbles*”, Applied Physics Letters, Vol. 91 (2007) 261501 (3pp). 査読あり

[学会発表] (計 7件)

- ① 梶田信、大野哲靖、坂口互, “タングステンへのレーザーとヘリウムプラズマの照射効果”プラズマ科学シンポジウム 2009 / 第 26 回プラズマプロセッシング研究会, 2009 年 2 月 3 日, 名古屋
- ② W.Sakaguchi, S.Kajita, N.Ohno, M.Takagi, “Formation condition of fiberform nanostructured tungsten by helium plasma irradiation”IC-PLANTS 2009, January 23, 2009, Nagoya, Japan.
- ③ 坂口互、梶田信、大野哲靖、高木誠, “ヘリウムプラズマ照射によるタングステンナノ構造の形成条件”第 25 回プラズマ・核融合学会年会, 2008 年 12 月 5 日, 宇都宮
- ④ 梶田信、大野哲靖、坂口互, “タングステンへのプラズマ・レーザー複合照射効果”第 25 回プラズマ・核融合学会年会, 2008 年 12 月 2 日, 宇都宮
- ⑤ S. Kajita, “Irradiation Effects of helium and laser on in-vessel mirror material”, International Workshop on Microwave-Laser

diagnostics and particle-Mirror interaction for burning plasma experiment, September 13, 2008, Shikano-shima, Japan.

- ⑥ W.Sakaguchi, S.Kajita, N.Ohno, M.Takagi, “Spectroscopy Study of High Z Material Ablation Phenomena under Helium Plasma Exposure”, 18th PSI Conference, May 29, 2008, Toledo, Spain.
- ⑦ 坂口 互、梶田 信、大野哲靖、高木 誠, “ヘリウムプラズマ照射下における高 Z 材のアブレーション現象の観測”, 電気学会全国大会, 2008 年 3 月 21 日, 福岡工業大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梶田 信 (KAJITA SHIN)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・講師
研究者番号：00455297