高強度フェムト秒レーザー照射による Cu 表面からのイオン・硬 X 線発生[†]

岡野泰彬・岸村浩明・矢崎秋夫・齊藤文一

弘中陽一郎・中村一隆・近藤建一・小栗慶之^{*}

東京工業大学応用セラミックス研究所 ☎ 226 8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259

^{*}東京工業大学原子炉工学研究所 ☎ 152 8550 東京都目黒区大岡山 2 12 1

(2001 年 3 月 13 日受理; 2001 年 3 月 21 日掲載決定)

Generation of Ions and X-rays from a Cu Target by Irradiation of High-power Femtosecond Laser

Yasuaki OKANO, Hiroaki KISHIMURA, Akio YAZAKI,

Fumikazu SAITO, Yoichiro HIRONAKA, Kazutaka G. NAKAMURA,

Ken-ichi KONDO and Yoshiyuki OGURI^{*}

Material and Structure Laboratory, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa 226 8503

^{*}Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology, 2 12 1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152 8550

(Received March 13, 2001; Accepted March 21, 2001)

We investigated ions and X-rays generated from a Cu target by irradiation of a femtosecond laser pulse at power densities above 10^{15} W/cm². The kinetic energy of positive ions was measured by a charge collector. The time-of-flight spectra showed multi-peaked structures. The ion energy of faster peak was estimated to be 4.6 keV at power density of 1×10^{17} W/cm². This ion energy increased with an increase in the laser energy. The ion energy of slower peak was estimated to be about 20 eV and independent of the laser energy. Generated X-rays were detected as hard X-rays in the range of 3-30 keV and as CuK α line diffracted from Si(111). Both intensities increased with an increase in the laser energy.

1. はじめに

近年の超短パルスレーザー技術の発展により、そのレーザー強度は飛躍的に増した。1980 年代後半に実証されたチャープパルス増幅 (Chirped pulse amplification, CPA)¹⁾と呼ばれる技術は、T³ レーザー (Table top terawatt laser) を実現するに至った。これにより、装置の小型化が進んだことも合わせて、実験室レベルでも容易にテラワット級の出力を得ることが可能になった。このようなレーザー光を集光すれば、高強度レーザー場を得ること

ができる。例えば、4 TW のレーザー光を直径 50 μ m に集光すると、平均レーザー場強度として 2×10^{17} W/cm² を得る。原子内のクーロン電場は 10^{15} W/cm² の強度に相当するので、電子の運動に大きな影響を与える。このときの電子は、光電場からポンドロモティブ力 (Ponderomotive force) と呼ばれる振動加速を受ける。波長を 790 nm とすれば、電子は 1×10^4 eV まで加速されることになる。このように、T³ レーザーはパルスあたりのパワー密度が極めて高く、物質との相互作用により高エネルギーの量子を発生させることができる。特に、適当な金属にパワー密度 10^{17} W/cm² 領域のレーザーパルスを照射すると、数 keV ~ MeV の硬 X 線が発生することが知られている。さらに、ターゲットに適当な金属を選ぶ

[†] 第 20 回表面科学講演大会 (2000 年 11 月 29 日 ~ 12 月 1 日) にて発表

E-mail: okano@kkhp.8.rlem.titech.ac.jp

ことで keV 領域の特性 X 線の発生が可能である²⁾。これらの X 線は、パルスの時間幅が数ピコ秒以下と極めて短く高輝度であるため、超高速 X 線回折実験へと応用されている^{3,4)}。Cu ターゲットでは、 10^{17} W/cm² のレーザーパルス照射で 6.5×10^{10} photons (4π sr pulse)⁻¹ の CuK α 線が観測された⁵⁾。しかし、このようなプラズマ中でのイオンのエネルギー分布について、詳しくはわかっていない。本研究では、 $10^{15} \sim 10^{17}$ W/cm² 領域のレーザーパルス照射により発生するイオン及び硬 X 線の同時測定を行い、イオンのエネルギー分布について調べた。

2. 実験装置

イオン及び硬 X 線の発生は、Cu ターゲットにレーザー光を集光照射することで行う。実験で使ったレーザーは、CPA 増幅による Ti:sapphire テラワットレーザーシステム (BMI 社, $\alpha 10$) である。システムは、オシレーター部・再生増幅器 (RGA)・二段階マルチパス増幅器・パルス圧縮部から構成される。レーザー光は、中心波長 790 nm において時間幅 52 fs (全幅半値)、最大パルスエネルギー 200 mJ/pulse (4 TW) であり、10 Hz で発振する。レーザーパルスには、主パルスの前後数ナノ秒にプレパルスが存在する。プレパルスは、RGA 中で 2 枚の偏光板とポッケルスセルから成るパルスサイザーにより、メインパルスとの強度比で 10^{-6} に減少される。また、増幅されたレーザー光が空気中でブレイクダウンを起こしたり不安定になるのを避けるために、圧縮器以下の光学系を 10^{-6} Torr の真空チャンバー下に配置した。実験配置を Fig. 1 に示す。レーザーパルスは軸外し放物面鏡により、円盤状 (厚さ 5 mm, 直径 70 mm) の Cu ターゲット上へ集光する。集光径は $1/e^2$ 値で約 44 μ m である。このときの平均パワー密度は 2×10^{17} W/cm² である。ターゲットは、レーザー発振に同期し回転することで、常に新しい面を供給する。レーザー光は P 偏光でターゲット垂直軸に対し、入射角度 60° で照射した。

Fig. 1 A schematic drawing of the experimental setup.

3. 飛行時間型イオン測定

イオンのエネルギー分布測定は、飛行時間型 (time of flight, TOF) 測定により行った。検出器には、静電プローブ型のチャージコレクター⁶⁾を用いた。レーザーアブレーションにより発生した荷電粒子を、直接ファラデーカップ型電極により捕らえる。チャージコレクターは、ターゲット垂直軸方向 10°, 距離 415 mm に配置した。このときの立体角は 5×10^{-5} sr である。検出信号は周波数帯域 350 MHz の高速増幅器により 30 dB 増幅し、帯域 1 GHz, サンプリング周波数 5 GS/s のデジタルストレージオシロスコープにより終端抵抗 50 Ω で測定した。飛行時間の原点は、フォトダイオードで反射光を検出し決定した。

Fig. 2 に、チャージコレクターにより取得した典型的な TOF スペクトルを示す。スペクトルは 500 回平均値である。照射エネルギーは、6 ~ 91 mJ/pulse ($5 \times 10^{15} \sim 1 \times 10^{17}$ W/cm²) の範囲で変化させた。TOF スペクトルでは複数のピークを観測したが、大きく分けて、到着時間が 10 μ s 以下の高速イオンと、30 μ s 前後の低速イオンを観測した。高速イオンは 2 つのピークから成り、信号強度及び到着時間に照射エネルギー依存を示した。照射エネルギーを増すと、信号強度は増加し到着時間は短くなった。TOF 測定では、到着時間が短いほど粒子の速度は速く、運動エネルギーは高いことを示す。低速イオンは、37 mJ/pulse 照射以上で顕著である。Fig. 3 に TOF スペクトルより求めたイオン電荷の速度分布、Fig.

Fig. 2 Time-of-flight spectra from a Cu target by irradiation of a 52 fs laser pulse at a wavelength of 790 nm. Each plot is an average of 500 laser shots. The drift distance from the laser spot to the detector was 415 mm and the direction angle was 10° with respect to the target normal.

Fig. 3 Ion velocity distributions.

Fig. 4 Ion energy distributions.

4にエネルギー分布を示す。このとき、イオンによるコレクターからの二次電子放出は無視し、エネルギーはCuイオンとして見積もった。速度分布では、 $10^4 \sim 10^5$ m/sにイオン電荷が分布している。同様に、エネルギー分布では最大10 keVまでのイオンを観測した。イオン電荷の相対数は低速側ほど多い。20 eVのイオン電荷はkeV領域のイオン電荷より2~3桁多く、特に37 mJ/pulse以上照射では顕著である。Table 1に、高速イオンの速いピークについて、到着時間・速度・エネルギーを示す。

4. 硬 X 線 観 測

発生した X 線については、硬 X 線及び特性 X 線 ($K\alpha$ 線, 8 keV) を測定した。硬 X 線は、チャンバー内に配置した Si 製の X 線フォトダイオード (XPD) により検出した。アッテネーターとして C (300 μ m 厚), Al (1.1 mm 厚) を使用し、XPD は主に 3~30 keV に感度をもつ。

Table 1 Velocity and energy of fast ions. Time represents an arrival time of the fast ion peak.

Laser energy (mJ/pulse)	Time (μ s)	Velocity (km/s)	Energy (keV)
91	3.5	120	4.6
67	3.5	120	4.6
37	4.4	94	2.9
12	5.6	74	1.8
6	6.8	61	1.2

Fig. 5 X-ray diffraction spectra from Si(111) of X-rays generated from a Cu target.

また、X 線をベリリウム窓でチャンパー外へ導き、Si (111) 面の回折線として、特性 X 線を Si 製半導体検出器であるリニアイメージセンサーにより検出した。

Fig. 5 に $K\alpha$ 線の Si (111) 面からの回折スペクトルを示す。信号は 500 回積算で取得した。スペクトルは $K\alpha_1$, $K\alpha_2$ 線をよく分離している。実線は、ピークを見やすくするためにローレンツ関数でフィットした。照射エネルギー依存として増加傾向を示したが、12 mJ/pulse 以下照射では回折線として $K\alpha$ 線を検出することができなかった。Fig. 6 に、検出した硬 X 線及び $K\alpha$ 線の、照射エネルギーに対するピーク強度の変化を示す。丸印は各取得データの平均値であり、エラーバーはその最大及び最小値を示す。硬 X 線は 500 回平均で取得した。照射エネルギーを増加させると、 $K\alpha$ 線及び硬 X 線ともに検出強度は増加傾向を示した。

5. 考 察

同程度のパワー密度を持つピコ秒レーザーでは、パルス幅 1.2 ps, 3×10^{16} W/cm² の Nd: ガラスレーザーによる Cu ターゲット照射で、 3.8×10^7 cm/s のイオンが観測

Fig. 6 Laser energy dependence of hard X-ray and CuK α line intensities.

Fig. 7 Laser energy dependence of fast ion energies.

されている⁷⁾。このイオンは、照射エネルギーを増加させると、速度・発生量ともに増加した。これは、本実験で観測した高速イオンと同様な傾向を示しており、イオン速度も 10^5 m/s 領域と同程度である。このような、高強度レーザー光と物質の相互作用では、電子のポンデロモータティブポテンシャルによるレーザー光吸収が重要になってくる⁸⁾。Fig. 7 に高速イオンと照射エネルギーの関係を示す。点線は、照射強度に対するポンデロモータティブエネルギーである。ポンデロモータティブエネルギーは、パワー密度 $10^{15} \sim 10^{17}$ W/cm² の範囲で 1 ~ 10 keV である。したがって、高速イオンはポンデロモータティブエネルギーと同程度まで加速されていることになる。また、同時に keV 領域の X 線を観測しており、イオン・X 線ともにエネルギー領域は良く整合している。

一方、通常のレーザーアブレーションに用いられる GW/cm² 程度のレーザー光照射の場合、熱的なアブレーションが主体であり、波長 351 nm・パルス幅 16 ns・フルエンス 3.8 J/cm² (2.3×10^8 W/cm²) の XeF エキシマレーザーによる Cu ターゲット照射では、 5.5×10^5 cm/s (5.5 eV) のイオンが観測されている⁹⁾。本実験で観測した低速イオンは 20 eV 付近にピークをもち、比較的近い値である。また、アブレーション後に深さ 10 μ m 前後の穴を観測したが、金属では表皮効果のためにレーザー光は浸透厚領域 (~10 nm) しか侵入しない。つまり、レーザー光と直接相互作用できる領域より 3 桁ほど深い領域がアブレーションしたことになる。観測したイオン電荷量をもても、低速イオンは高速イオンより相対量で 2 ~ 3 桁多く、この深い領域から発生したイオンは低速イオンに対応する。これらのことから、20 eV 付近のピークは熱的なアブレーションであると考えられる。

6. ま と め

フェムト秒 Ti:sapphire レーザー光を Cu ターゲットへ集光照射し、発生するイオン及び硬 X 線の同時測定を行った。 1×10^{17} W/cm² 照射では、120 km/s (4.6 keV) のイオンを観測した。この領域のイオンはレーザー照射強度依存を示し、 5×10^{15} W/cm² 照射では、61 km/s (1.2 keV) であった。また、観測した 3 ~ 30 keV の硬 X 線と K α 線の検出強度にも、照射強度に対して増加傾向があった。観測したイオンの中で、最もイオン量の多い領域は 10 km/s (20 eV) であった。しかし、これは顕著な照射エネルギー依存を示さなかった。

謝 辞

装置の設計製作に協力を頂いた長谷川光雄氏に深く感謝します。本研究は、科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業 (CREST) プログラムの支援のもとに行われた。

文 献

- 1) D. Strickland and G. Mourou: Opt. Comm. **56**, 219 (1985).
- 2) Y. Fujimoto, Y. Hironaka, K.G. Nakamura, K. Kondo, M. Yoshida, M. Ohtani and H. Tsunemi: Jpn. J. Appl. Phys. **38**, 6754 (1999).
- 3) C. Rose-Petruck, R. Jimenez, T. Guo, A. Cavalleri, C.W. Siders, F. Ráksi, J.A. Squier, B.C. Walker, K.R. Wilson and C.P.J. Barty: Nature **398**, 310 (1999).
- 4) Y. Hironaka, A. Yazaki, F. Saito, K.G. Nakamura, K. Kondo, H. Takenaka and M. Yoshida: Appl. Phys. Lett. **77**, 1967 (2000).

- 5) M. Yoshida, Y. Fujimoto, Y. Hironaka, K.G. Nakamura, K. Kondo, M. Ohtani and H. Tsunemi: Appl. Phys. Lett. **73**, 2393 (1998).
- 6) E. Woryna, P. Parys, J. Wolowski and W. Mróz: Laser Particle Beams **14**, 293 (1996).
- 7) J. Badziak, A.A. Kozlov, J. Makowski, P. Parys, L. Ryc, J. Wolowski, E. Woryna and A.B. Vankov: Laser Particle Beams **17**, 323 (1999).
- 8) S.C. Wilks, W.L. Kruer, M. Tabak and A.B. Langdon: Phys. Rev. Lett. **69**, 1383 (1992).
- 9) S. Amoroso, V. Berardi, R. Bruzzese, N. Spinelli and X. Wang: Appl. Surf. Sci. **127 129**, 953 (1998).