レーザ光照射によって生成された固体ターゲット からの多荷イオンのエネルギー分析

後藤時男, 岸くめよ, 奥田孝美

(名古屋大学工学部)

(1982 年 4 月 19 日受理)

Energy Analysis of Multiply-Charged Ion Produced by Irradiating Laser Light on Solid Targets

Tokio Goto, Kumeyo Kishi and Takayoshi Okuda

(Received April 19, 1982)

Abstract

A Q-switched ruby laser pulse is focused on various targets (Al, Be, C, Cu, Mo, Ti and W) to produce multiply-charged ions. The maximum energy is found to be proportional to $\Phi^{4/9}$, Φ is the laser intensity. Also, the energy distributions of multiply-charged ions are analyzed by means of a 127° electrostatic analyzer.

§ 1. はじめに

レーザ光を固体ターゲットに照射すると, その強度に従って光電子放出, 熱電子放出およびプラズマ生成の過程で起こる。爆縮による高密度化を利用してローソン条件を達成させようとするレーザ核融合は, その極限的利用である。

しかし, 中程度の強度で生成されるプラズマは, 発生するイオンの高エネルギー性と多荷性に着目され, 加速器用のイオン源あるいは紫外あるいはX線源として広く利用されるようになった。

本研究では, 色々の金属ターゲットからレーザ光によって発生するイオンのエネルギーを静電型分析計を用いて測定し, レーザ強度およびターゲット材料依存性を明らかにする。

§ 2. 実験装置と方法

本実験に用いたレーザはルビーレーザで，可飽和色素溶液（クリプトシアニンをエチルアルコールで溶かしたもの）によってQスイッチングを行い，出力20 MW，パルス幅25～30 nsのレーザ光を得る。強度の変化には，色ガラスフィルターを用い，エネルギーメータによって強度を測定した。

ターゲットとしてはAl，Be，C，Cu，Mo，Ti およびWを用い，電解研磨および超音波洗浄をした後，高周波ボンバーダによってガスの排除を行う。このようなターゲットを 10^{-6} torrの真空中に排気できる真空室の中に取付け，磁石を利用してターゲット軸の周りに回転できるように構造とし，1回の照射の後レーザビームが当たる場所をずらすことによって100～150ショットが可能である。ターゲットの半径は2 cm，厚さ0.5～1 mmの円板である。

焦点距離40 mmのレンズでターゲット上にレーザ光を集光させる。このときスポットの面積は 10^{-4} cm²である。第1図のように反射率30%のミラーを用いてパワーをモニターし，数回の実験を行い平均を取る。

イオンエネルギーの測定には127°型静電エネルギー分析器を用いる。ターゲットで生成，膨脹するプラズマ中のイオンエネルギーを測るため，図のようにターゲットの法線に対して45°の方向からイオンを分析器中に入れる。分析器の分解能は5.7%（中心軌道半径 $r=7$ cm，スリット半径 $\Delta r=4$ mm）である。遠心力と電界による力の釣り合いを保つイオンが出口スリットを通過し，金属メッシュを通り抜け

－15 kVの電位のアルミ蒸着させた電極に衝突して2次電子を発生する。2次電子はアルミ蒸着されたシンチレータ（ポリエチレン）を衝撃し4500 Åの光を放出する。この光を光電増倍管で検出し信号を得る。光電増倍管の時間分解能は50 ns以下で，電圧は1 kVとした。なお本実験では四重極部を使用しない。イオンエネルギーは飛行時間によって決定される。飛行時間は荷電数 Z の平方根に逆比例するので，

第1図 実験装置

レーザ照射によって生成された固体ターゲットからの多荷イオンのエネルギー分析

第2図 光電増倍器の信号 (a) C, (b) Mo, (c) Cu ($\phi = 10^{11} \text{W/cm}^2$)

第2図に示すように，4価のイオンは1価のイオンの飛行時間の1/2である。この測定はレーザー光強度 $\Phi = 10^{11} \text{ W/cm}^2$ のときのもので，Cは4価，MoおよびCuは6価のイオンまで生成されている。

第3図の実線は分析器の電圧から計算された1価イオンの速度を示し，○，△および□の記号を付した点は飛行時間から求められた値である。

第3図 1価イオンの分析器電圧とイオン速度

§ 3. 実験結果と考察

飛行時間法によってイオンのエネルギー分布を求めるには，信号のピーク値をとって入射イオン数を評価する方法と，信号

第4図 光電増倍器の積分信号 (Cu, $\Phi = 10^{11} \text{ W/cm}^2$)

第5図 積分信号から求めたエネルギー分布
(Cu, $\Phi = 1.1 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$)

第6図 積分信号から求めた速度分布 (Cu, $\Phi = 1.1 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$)

レーザ光照射によって生成された固体ターゲットからの多荷イオンのエネルギー分析

第7図 原信号から求めたエネルギー分布 (Cu)

第8図 原信号から求めたエネルギー分布

の時間積分値をとって入射イオン数を評価する方法がある。

第4図はCuについての第2図(c)で示す信号を増幅器(40dB)で増幅し時定数 $22 \mu\text{s}$ の積分器を通して得た信号を示す。第5図はこのような積分波形から得たエネルギー分布を示す。さらに第6図は、第5図の横軸を速度に換えた速度分布を示し、いずれもピーク値に対して規格化している。第6図の実線はドリフト速度を重ね合せたマクスウェル分布を示し、これから得ら

レーザ光照射によって生成された固体ターゲットからの多荷イオンのエネルギー分析

れるイオン温度は20～50eVである。

第7図はCu ターゲットの場合、レーザ強度 Φ を $1.2 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ から $1.1 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ に増加するときに、ピーク値を基にして求めたエネルギー分布を示す。このうちの $\Phi = 1.1 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ の分布と、積分値を基にして求めた第5図を比べると、両者は高エネルギー部分は同一の形をもつが第5図では低いエネルギー部分の測定点が欠ける。これはこの方法の欠点であり、また低い強度での測定が難しい。本研究では強度および質量依存性をしらべることを主目的とするので原信号を基にする方法を採用した。

また第7図から強度の増加とともにイオンの荷電数が増加することが判る。第8図は各種ターゲットにおけるエネルギー分布を示す。なおエネルギー分布に凹みが現われるが、その原因として高い荷電イオンへの変換が考えられる。⁽¹⁾ また低エネルギー部では荷電数による分布の差は大きい、高エネルギー部では分布の形が次第に近接し、あるエネルギー値 $E_{\max}$ で重なる。この $E_{\max}$ の強度依存性を各種ターゲットについて示したのが第9図である。 $E_{\max}$ は強度 Φ に対して $\Phi^{4/9}$ の依存性を示し、また原子量の大きい材料ほど $E_{\max}$ が大きいことが判る。

H. Puell は、⁽²⁾ 定常的な流体モデルを用いてイオンの膨張エネルギー $E_{\max}$ を入射レーザ光強度 Φ 、原子量および荷電数 Z の関数として表わす式を示した。すなわち

$$E_{\max} = 5 Z \alpha^{1/3} \left(\frac{3 M C R}{50} \right)^{2/9} \Phi^{4/9}, \quad (1)$$

ここに $\alpha = Z + 1/Z$, $C = 2.5 \times 10^{-55}$ (C. G. S.単位), R はスポット半径である。上式は、 $E_{\max}$ が M の $2/9$ 乗、 Φ の $4/9$ 乗に比例することを示し、第9図の実線は各金属について

第9図 $E_{\max}$ と Φ の関係

第10図 $E_{\max}$ と M の関係

て、上式で平均的な Z を2とし、ターゲットからのプラズマの角度分布を $\cos^2 \theta$ (θ はターゲット面の法線に対する角)として計算したもので、 Φ の依存性が実験結果とよく一致することが判る。

第10図は $E_{\max}$ と M の関係を示すプロットで, $E_{\max}$ の M 依存性が(1)式で表わされることを示す。

レーザ光強度を増やすと高い荷電のイオンが現われるので, 強度を変化してエネルギー分布を測ることによって各荷電イオンの出現のしきい強度を求めることができる。第11図にCuについてエネルギーと強度のプロットを示し, これから Cu^{2+} から Cu^{7+} までのしきい強度を知ることができる。第12図は4つの金属についての各荷電イオンの出現のしきい強度と電離電圧との関係を示す。

第11図 E と Φ の関係 (各荷電イオンの出現強度)

第12図 各荷電イオンの出現のしきい強度と電離電圧

§ 4. あとがき

中程度のパワー ($10^9 \sim 10^{11} \text{ W/cm}^2$) のレーザ光を金属ターゲットに照射するとき最大エネルギー $E_{\max}$ が $0.1 \sim \text{数 keV}$ のエネルギーのイオンが得られ, レーザ強度 Φ に対して $\Phi^{4/9}$, 原子量 M に対して $M^{2/9}$ の依存性が得られ, Puell の理論との一致を確かめた。

また 10^{11} W/cm^2 程度のパワーではW, Cu およびMo で6価, CおよびAl で4価のイオンを観測し, それらのエネルギー分布を測定した。

参 考 文 献

- 1) Yu. A. Bukovski et al, Soviet Phys. JETP 33, 706 (1971).
- 2) H. Puell, Zeit. Naturforsch. 25a, 1807 (1970).