

希ガス多価イオンの高エネルギー内殻電子励起分光による プラズマ励起素過程の研究

大浦正樹¹, 山岡人志¹, 川面 澄², 高広克己², Y.Zou³, R.Hutton⁴, 早石達司⁵, 森川 司²,
寺井 睦², 塚本一徳^{1,5}, 吉川英樹⁶, A. M. Vlaicu⁶, 福島 整⁶

¹ 理化学研究所・播磨研究所, ² 京都工芸繊維大学, ³ 中国・復旦大学, ⁴ ルント大学
⁵ 筑波大学, ⁶ 物質材料研究機構・物質研究所

背景： 今日のテクノロジーを支えている半導体産業において、素子の高集積化や高性能化を図るためには微細加工技術の向上が必要とされている。この微細加工技術のエッチング行程には、プラズマエッチングやスパッタエッチングなどの方法が使われる。一方、プラズマ CVD による薄膜作成方法も、その多様性ゆえに、無機材質から有機材質、更にそれらの複合物質まで様々な物質の製膜に応用できることが知られている。しかし、プラズマの基礎的な特性、特にプラズマ中のイオンの特性や素過程を理解することは、このような応用の観点から重要であるが、必ずしもわかっていない。

高輝度放射光を用いたプラズマの基礎研究においては、対象となる元素を自由に選べることから、高融点物質のプラズマ中の基礎過程やそのプラズマ自体の制御にも結びつく可能性を有している。本研究では、こうした微細加工技術を支えているプラズマの素励起に着目し、プラズマ中の各種イオンの電子構造や光吸収といった励起素過程を研究し、高い元素選択性を利用したプラズマの精密制御技術の新しい展開を図るための基礎情報を得ることを目的としている。

本研究では、電子サイクロトロン共鳴型イオン源(ECRIS)のプラズマチェンバーから引き出した各種イオンと高輝度単色化放射光を合流ビーム法により相互作用させ、その結果として生成される光イオンの価数分布及びその励起エネルギー依存性を調べることでプラズマ励起の基礎的な特性を解析することを目指す。本申請では、具体的な研究の展開の足掛かりとして、希ガス多価イオン(Ar^{8+} イオン、Ne 様 Ar イオンと呼ぶこともある)を標的とした実験を行った。

実験： 実験は BL15XU の第二実験ハッチに多価イオン光吸収実験装置^{1,2)} を持ち込んで行った。実験装置の概念図を図 1 に示す。ECRIS によって生成された Ar 多価イオンは 10kV の電圧によって多価イオンビームとして加速され、価数選別電磁石によって Ar^{8+} イオンが選択的に放射光との相互作用領域に輸送される。この相互

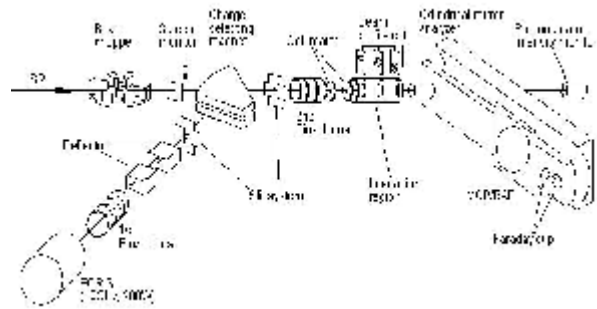


図 1. 実験装置は多価イオンの生成部(ECRIS)、輸送部(静電レンズ、価数選別電磁石及びポリメータ等)、相互作用領域、光イオン検出部等により構成される。

作用領域内で BL15XU の挿入光源から得られる高輝度放射光と合流させ、そこで起こる光吸収過程を調べる。このように異なる種類のビームを使って実験する場合、その相互作用領域内で一定区間双方のビームを合流させて輸送することで標的密度の希薄さを補う実験手法を合流ビーム法と言う。この実験手法の有効性については先の論文で報告している³⁻⁵⁾。

本研究で標的として用いる Ar^{8+} という多価イオンは、M 殻の電子が全て剥ぎ取られた状態にある。従って、中性 Ar の場合には起こり得なかった $1s \rightarrow 3p$ という共鳴励起のチャンネルが開くことになる。しかし、その励起断面積どころか共鳴エネルギーの準位すらも良く分かっていないというのが現状である。そこで、光吸収実験に先立って $1s \rightarrow 3p$ 共鳴エネルギーの計算を独立粒子模型で行った⁶⁾。

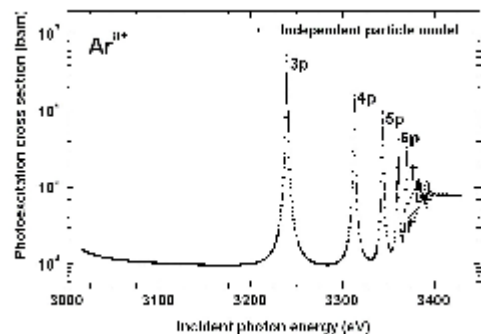


図 2. 独立粒子模型による Ar^{8+} イオンによる光吸収断面積の理論計算結果。計算は X.M.Tong 氏による。

この計算結果を基に励起関数を求める領域を特定し、1s → 3p 共鳴に相当する入射エネルギー領域 (~3.24keV) にて多価イオンビームと高輝度放射光ビームとの合流ビーム法を試みた。このエネルギー領域における合流ビーム法は世界初の試みであるが、実験装置が全てハッチの中に設置されていたために、先の実験と比べて装置の精密アライメントが極めて難しかったことを記しておく。図3に本実験により得られた相互作用領域における Ar⁸⁺イオンと放射光との空間分布を示す。図は、相互作用領域内のビーム軸方向3点 (4.4cm 間隔) で計測した多価イオンビーム (左側) と放射光ビーム (右側) の空間分布を示すが、水平方向の位置は非常によく合っていると見える。この測定から、合流ビーム法によって励起断面積を決める際に重要な情報となる2つのビームの重なり積分 (式1) を求めることができる。

$$F_{xy}(z) = \frac{\iint i(x,y) dx dy \iint j(x,y) dx dy}{\iint i(x,y) j(x,y) dx dy} \quad (1)$$

ここで $i(x,y)$ と $j(x,y)$ はそれぞれイオンの電流密度と放射光の光子束密度を表す。今回の測定の結果、 $\Delta x \Delta y \cdot F_{av} / L = 1.3 \times 10^{-2}$ という結果を得た。ここで $\Delta x \Delta y (=10^{-4} \text{cm}^2)$ は測定に使用したスリットの開口幅、 F_{av} は (1) 式により3点で求め

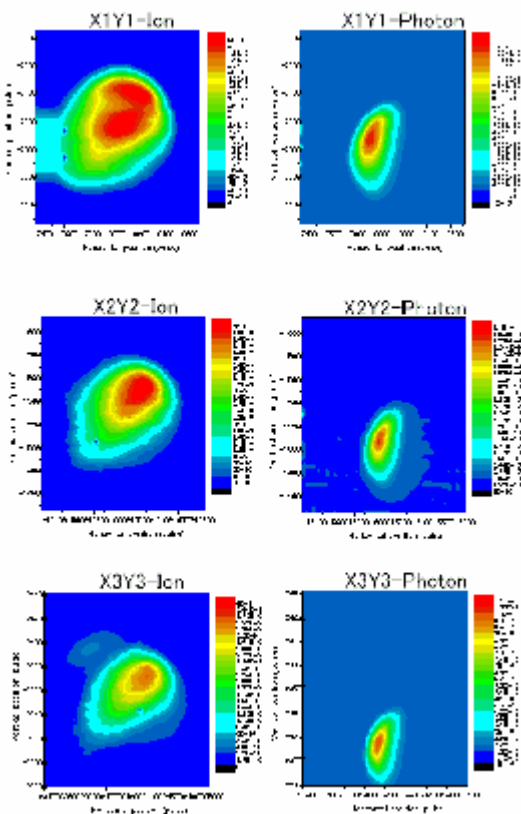


図3. 相互作用領域内における各ビームの空間分布。X3Y3 が上流側となっている。

た値の平均値、 L は相互作用領域の長さ(12cm)を現している。

結果: 今回の測定では Ar⁸⁺多価イオンの光吸収スペクトルを取得するためのエネルギースキャンの最中に ECRIS の高周波電源が故障してしまい、残念ながら当初の目的を達成することは出来なかった。しかしながら、次回へのステップとして光イオン検出部の較正を行うために実験装置を PHOBIS (PHOton Beam Ion Source)⁷⁾ モードとして運転を行うことができた (図4上部に測定の概念図を示す)。これにより、内殻励起 Ar の脱励起種を光イオン検出部で捕らえ、図4下部に示すような中性 Ar の 1s → np ($n = 4, 5, \dots, \infty$) 領域の吸収スペクトルを取得した。

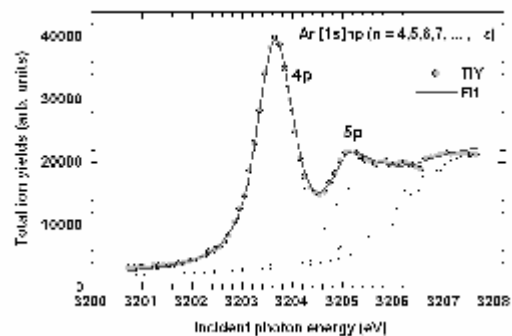
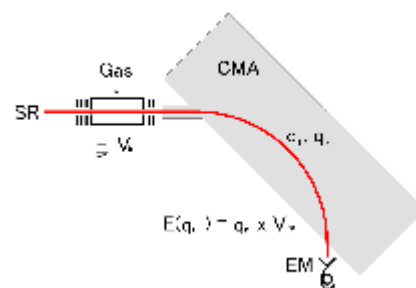


図4. (上)高電圧に浮いた相互作用領域に Ar ガスを導入し、放射光で励起することによって生成された Ar イオンが電圧で加速されてイオンビームとして CMA で検出される。(下)実験装置を PHOBIS モードで運転し、光イオン検出部で計測した全イオン収量スペクトル。中性 Ar の 1s → np ($n = 4, 5, \dots, \infty$) 吸収スペクトルに相当する。

参考文献

- 1) M.Oura *et al.*, J. Synchrotron Rad. **5**, 1058 (1998).
- 2) M.Oura *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **71**, 1206 (2000).
- 3) M.Oura *et al.*, Phys. Rev. **A63**, 014704 (2001).
- 4) H.Yamaoka *et al.*, Phys. Rev. **A65**, 012709 (2002).
- 5) K.Kawatsura *et al.*, J. Phys. **B35**, 4147 (2002).
- 6) X.M.Tong, private communications.
- 7) K.W.Jones *et al.*, Phys. Lett. **97A**, 377 (1983).