

立教大学学術推進特別重点資金 (立教 S F R)
大学院学生研究
2017年度研究成果報告書

研究科名	立教大学大学院			理学研究科	物理学専攻		
研究代表者 (2018年3月現在のものを記入)	在籍研究科・専攻・学年		氏名				
	理学研究科・物理学専攻 博士課程後期課程1年		佐和 弘祥 印				
指導教員	所属・職名		氏名				
	理学部・物理学科・教授		平山 孝人 印				
自然・人文・社会の別	自然	人文	社会	個人・共同の別	個人	共同	名
研究課題	希ガス固体表面の低速多価イオンビーム衝撃における二次イオン放出過程の研究						
研究組織 (研究代表者・共同研究者) ※2018年3月現在のものを記入	在籍研究科・専攻・学年		氏名				
	研究代表者 理学研究科・物理学専攻 博士課程後期課程1年		佐和 弘祥				
研究期間	2017 年度						
研究経費 (1円単位)	(支出金額) 497,422 円 / (採択金額) 500,000 円						

研究の概要 (200~300字で記入、図・グラフ等は使用しないこと。)

希ガス固体への低速多価イオン衝撃における二次イオン脱離過程には、入射イオンの持つ運動エネルギー・静電的内部エネルギーの両者が関与していることが、これまでの研究により明らかになっている。本研究では、希ガス固体表面への浅い入射角度での低速多価イオン衝撃実験において、固体表面で散乱した入射イオン(以下、反射イオン)と、衝撃により固体表面より脱離した二次イオン(以下、脱離イオン)の同時計測を行う。この実験により、衝突後の反射イオン価数と、脱離イオンの質量分布の関係をj得ることで、イオン脱離において消費される入射イオンの静電的内部エネルギーを定量的に分析し、イオン脱離過程の解明を行う。

キーワード (研究内容をよく表しているものを3項目以内で記入。)

[多価イオン] [希ガス固体] [ポテンシャルスパッタリング]

研究成果の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)

電子が 2 つ以上電離したイオンを多価イオンといい、多価イオンはその価数までのイオン化ポテンシャルの和で表される静電的内部エネルギー(以下、ポテンシャルエネルギー)を持つ。運動エネルギーが数 keV 程度の低速多価イオンが固体表面へ衝突すると、その運動エネルギーに比べて無視できない大きさのポテンシャルエネルギーが固体表面へ移行することにより、運動エネルギー移行のみが支配的な衝突では見られない様々な現象が生じることが報告されており、新たな固体表面の加工手法、分析手法としての応用が期待されている。

希ガス固体は、Van der Waals 力にのみよって結合する固体であり、結合エネルギーが非常に小さい(Ne 固体では 1 原子当たり 0.02 eV)ことから、固体中に電子的励起状態が生じると高い確率で粒子脱離に結びつく。また、希ガス固体の電子構造は孤立原子のそれと類似していることから、エネルギーを持った粒子と固体表面の衝突による相互作用過程を簡略化して考察できる試料として、幾つかの研究が行われてきた。

本研究では、希ガス固体におけるポテンシャルエネルギー移行に起因する二次粒子脱離(ポテンシャルスパッタリング)過程を定量的に解明するため、衝突によって入射イオンが失った価数と、その衝突によって脱離したイオン種を同時計測することで、イオン脱離において消費されるエネルギーの定量的な分析を行う。実験では、衝突後のイオン価数を測定するため、イオンビームを固体表面に対して浅い角度($\leq 5^\circ$)で衝突させ、散乱した反射イオンを検出する。反射イオンの検出には、位置有感型イオン検出器を用い、検出器手前に一様電場領域を設けることで、検出位置の変化から反射イオン価数を分析する。また、希ガス固体標的正面に脱離イオン検出器を設け、反射イオン検出時刻を基準とした脱離イオンの飛行時間測定を行う。

実験装置には、昨年度までに報告者が中心となって開発したものを用いるが、性能評価実験を行ったところ、反射イオンの反射角度分布が想定以上に広く、一様電場による軌道変位から価数分布を分析することが困難であることが明らかになった。この問題を解決するため、反射イオン軌道を限定するためのスリット機構を開発し、実験装置へ追加した。スリット幅は 0.5 mm とし、スリット位置を可変できる構造として、任意の軌道を選択できる設計とした。スリット機構の性能評価として行った Ne 固体への 6 keV Ar⁶⁺イオン衝突実験では、価数選別器電圧 350 V、反射角度 1.7° の場合、反射イオン検出位置の分布は 2mm であるのに対し、価数の変化による検出位置変化は 8 mm であり、十分な精度で反射イオン価数を選別できることが確かめられた。

反射イオン用スリット機構を追加した装置を用いて、Ne 固体表面への 6keV Ar⁶⁺イオン衝撃実験における反射イオン・脱離イオン同時計測実験を行った。この結果、反射イオン価数 q_r が $q_r=0, 1$ に分布する場合、脱離 Ne_n⁺イオンのサイズごとの収率 $Y(n)$ について、 $q_r=0$ の反射イオンと同時計測した脱離イオンでは $Y(1) = Y(2)$ であるのに対し、 $q_r=1$ の反射イオンとの同時計測では $Y(1) > Y(2)$ となることが明らかになった。

ここで、Ar^{q+}イオン衝撃による Ne 原子のイオン化過程を考えると、 $q \geq 2$ の場合は単純なポテンシャルエネルギー移行による過程として説明できるのに対し、 $q=1$ の場合は、Ne 原子のイオン化ポテンシャルが Ar⁺イオンのポテンシャルエネルギーを上回っているため、イオン化過程には何らかの形で運動エネルギー移行の寄与が含まれる。これを前提にすれば、本研究で得られた同時計測結果について、 $q_r=0$ の反射イオンと同時計測した脱離イオンに比べて、 $q_r=1$ と同時計測した脱離イオンはポテンシャルエネルギー移行に起因する過程で脱離した成分が優勢であると考えることができる。ここから、今回得られた 6 keV Ar⁶⁺ → Ne 固体での同時計測結果について、ポテンシャルエネルギー移行が優勢な衝突過程では、Ne⁺の脱離収率が増加するという解釈が可能になる。この解釈は、先行研究(K. Fukai et al., J. Phys. Cond. Matt. **22**, (2010) 084007)での、Ne 固体表面への 1keV Ar^{q+}衝撃($\theta_{in} = 30^\circ$)において、 q の上昇に従って Ne⁺を含めた小サイズクラスターイオンの脱離収率が増大するとの報告と矛盾しない。これらの成果については、国内学会にて発表済み [2-5] である。

研究成果の概要 つづき

なお、今回の 6 keV Ar⁶⁺ → Ne 固体衝撃実験においては、イオン入射角度の変化によって反射イオン価数 q_r の分布が変化することが確認されており、特に q_r の最大値については、 $q_r=4$ に達する場合もあった。このことには、入射角度によって固体表面垂直方向の入射イオン速度成分が変化するために、固体表面への最近接距離が変化することに起因した、運動エネルギー・ポテンシャルエネルギー移行過程の変化が関与していると考えられる。しかし、現在の装置構成では、イオンビームの入射角度を正確に決定する事ができず、入射角度に関して定量的な分析を行うことが困難である。この点を解消するため、イオンビーム入射角度を限定するためのスリット機構を新たに設計・製作した。このスリット機構は、反射イオン軌道を特定するためのスリット機構と同様に、可動式として任意の入射角度を選択できる構成としている。本機構の製作及び実験装置への取付けは完了しており、現在性能評価実験を行っている。

また、希ガス固体中に生成された電子的励起過程の緩和過程における粒子脱離の解明は、低速多価イオン衝撃によるポテンシャルスパッタリング過程の分析において重要な役割を果たす。低エネルギー電子衝撃による希ガス固体からの粒子脱離観測実験を行うため、報告者はこれまでに高分解能電子ビーム源として、光電効果型電子銃の開発を行ってきた。本年度は、これまでの開発成果と希ガス固体を標的とした電子衝撃実験の結果をまとめた論文を出版[1]するとともに、国内学会での口頭発表[6]を行った。

研究発表 (研究によって得られた研究経過・成果を発表した①～④について、該当するものを記入してください。該当するものが多い場合は主要なものを抜粋してください。)

- ①雑誌論文 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)
- ②図書 (著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)
- ③シンポジウム・公開講演会等の開催 (会名、開催日、開催場所)
- ④その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

① 雑誌論文

[1] H. Sawa, M. Anzai, T. Konishi, T. Tachibana and T. Hirayama, Development of a UHV-compatible Low-energy Electron Gun using the Photoelectric Effect, Journal of the Vacuum Society of Japan **60**, (2017) 467-70.

② 図書

なし

③ シンポジウム・公開講演会等の開催

なし

④ その他 (学会発表)

[2] 佐和弘祥, 内田俊太郎, 高橋舞, 水越友里菜, 植田寛和, 平山孝人, Ne 固体表面への低速 Ar 多価イオン衝撃における反射イオン・脱離イオン同時計測, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月, 東京理科大学野田キャンパス, 24pK204-5.

[3] 内田俊太郎, 高橋舞, 水越友里菜, 佐和弘祥, 植田寛和, 平山孝人, 希ガス固体での多価イオン衝撃における反射イオンの観測, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月, 東京理科大学野田キャンパス, 24pK204-4.

[4] 佐和弘祥, 内田俊太郎, 高橋舞, 水越友里菜, 植田寛和, 平山孝人, Ne 固体への低速 Ar^{q+} 衝撃における脱離イオン質量分布のイオン入射角依存性, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 岩手大学上田キャンパス, 21aA29-7.

[5] 内田俊太郎, 高橋舞, 水越友里菜, 佐和弘祥, 植田寛和, 平山孝人, 反射イオン測定による希ガス固体と多価イオン間の相互作用の研究, 原子衝突学会第 41 回年会, 2017 年 9 月, 上智大学四ツ谷キャンパス, 1P13.

[6] 佐和弘祥, 安西央, 小西達也, 立花隆行, 平山孝人, 超高真空に対応した光電効果型低エネルギー電子銃の開発, 第 58 回真空に関する連合講演会, 2017 年 8 月, 横浜市立大学金沢八景キャンパス, 2Cp05.