

氏名 後藤 信 朗

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第57号

学位授与の日付 平成5年9月30日

学位授与の要件 数物科学研究科 加速器科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学位論文題目 熱陰極マグネトロン真空計

— 極高真空領域の感度と測定下限の測定と解析 —

論文審査委員 主査 助教授 齊藤 芳 男

教授 木村 嘉 孝

教授 高田 耕 治

教授 小林 正 典

教授 黒川 眞 一

教授 石丸 肇

助教授 水野 元

（高エネルギー物理学研究所）

教授 金持 徹（神戸大学）

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、熱陰極マグネトロン真空計について、残留電流の測定および感度を決定している機構について述べたものである。

10^9 Pa以下の真空領域を極高真空とよぶ。このような極高真空の圧力測定は電離真空計による測定が一般的であり、精度もよい。測定原理は、残留ガスを加速した電子で電離し、生成されたイオン電流を測定する。圧力はイオン電流の強度に比例するので、その強度から圧力を求めることができる。しかし極高真空領域では信号強度は微弱となり、残留電流が信号電流にたいして無視できない大きさとなる。このような問題がおきるのは 10^{10} Pa オーダーあるいはそれ以下の圧力領域である。電離真空計の残留電流は、軟X-rayによる光電子電流とアノードからの電子衝撃脱離 (Electron Stimulated Desorption、略してESD) イオンである。

電離真空計は真空計内に電子をためこむ電子トラップ型のものとそうでない電子非トラップ型のものがある。両者の特徴はエミッション電流の大きさの違いにある。残留電流の観点からみると、電子トラップ型の真空計はエミッション電流が小さいためにアノードに吸着している気体分子がエミッション電流により取り除かれる効果がなく、そのため測定可能限界は軟X-rayによる光電子電流よりもESDイオンできまると推測されてきた。しかし、実際にESDイオンにより測定可能限界が定まっているかどうかは不明である。感度の観点からみると、電子トラップ型は、エミッション電流が小さくても電子が真空計内に滞在できる時間が長いので電子数を真空計内に確保できる。電子非トラップ型のは、電子滞在時間が短いのでエミッション電流は大きくとらないと電子数を確保できない。両者のエミッション電流は6桁ほどの違いがある。しかし得られるイオン電流は1桁ほどの違いしかなく、これは真空計内に存在する電子数が同程度であるということを示唆している。また電子トラップ型の真空計は信号電流がエミッション電流に比例していない。これはつめこまれる電子数に上限があることを示唆するものであり、得られる感度と関係がある。しかしこれらの機構については明らかになってはいない。そこで本論文では、電子トラップ型の真空計のなかでも残留電流を小さくする意味で、最もエミッション電流が小さく、最もトラップ能力の優れた熱陰極マグネトロン真空計を研究対象とし、残留電流を実験で評価すること、感度を定める機構を実験結果をもとにして明らかにすること、を試みた。

残留電流の測定は電子の加速電圧とコレクター電流の特性をみるアルバート法により行なった。残留電流の測定は磁場のない状態で行なった。測定を行ったときのチャンバーの真空度は 5×10^9 Paである。この真空度では、磁場がないとイオン電流は残留電流に比べ3桁ほど小さな値となり、そのため残留電流を測定できる。ESDイオンの測定は、酸素ガスにたいするexposure量のちがう状態のアノードについて行った。 10^6 Paの真空度で行ったチャンバーのベーキングの最中に、100 mA、600 V、3600 secの電子衝撃で脱ガスしてある真空計のアルバートプロットを 5×10^9 Paの真空度で得た。残留電流は加速電圧の0.83乗に比例した。この後、アノードを100 mA、600 V、3600 secの電子衝撃で脱ガスを行なった直後でのアルバートプロットを測定した。この残留電流は加速電圧の1.1乗に比例しているため、X-rayによる光電子電流であると結論した。軟X-rayによる光電子電流とエミッション電流の関係をエミッション電流が 10^8 Aから 10^6 Aの範囲で測定し、それらは比例するという結果を得た。脱ガス前と脱ガス後の残留電流の差をとると、加速電圧が100 eV~200 eVのあたりに山を持った特性が得られた。これより脱ガス後に減少した残留電流はESDイオンであると結論した。残留電流とエミッション電流の比は 10^7 のオーダーであった。ESDイオンの効果をみるために、ステンレス鋼製のアノードを電子衝撃で脱ガスした後に酸素ガスにさらし、その直後にアルバートプロットをとった。ESDイオンによる残留電流は、酸素ガスへのexposure量により異なった。exposure量が 10^4 Langmuirのときと0.17 Langmuirのときでは、エミッション電流にたいする残留電流の比がそれぞれ 10^6 、 10^5 であった。アルバートプロットは、電子の加速電圧が100 eV~200 eVのあたりに肩を持った特性が得られた。ESDイオンの測定値からアノードへの酸素の吸着量を計算すると、 10^4 Langmuirのとき、酸素分子による被覆率が1のオーダーとなる。このときのESDイオンの測定値がESDイオン生成の上限であると結論した。アノードを酸素ガスにさらしたときの、残留電流とエミッション電流の関係をエミッション電流が 10^8 Aから 10^6 Aの範囲で測定し、それらは比例するという結果を得た。磁

場のない状態で行なった残留電流の測定値を、磁場のある状態での残留電流に変換するために、アノードを分割してエミッション電流のアノードへの到達分布を磁場のあるときとないときで測定した。熱陰極マグネトロン真空計の残留電流はエミッション電流にたいする残留電流の比としてみると、その値は軟X-rayによる光電子電流を低減する幾何学的な構造をもたない3極管型真空計と同程度であり、小さなものではない。熱陰極マグネトロン真空計はエミッション電流が小さいので残留電流が小さくなる。以上から熱陰極マグネトロン真空計の残留電流の特徴が明らかにされた。

感度を定める機構を調べるため、イオン電流の特性を測定した。イオン電流にたいして、印加する磁場と電場にたいする依存性、エミッション電流にたいする依存性、分割コレクターを用いたイオンのコレクター到達分布、圧力にたいする依存性、を測定した。測定結果からつぎの特性が得られた。イオン電流の最大を与えるような、磁場と電場の組み合わせがある。エミッション電流を増加していくとイオン電流は飽和する傾向にある。イオンは真空計内の中心軸付近で主に生成される。これらの測定結果をもとに、電子トラップの条件の解析、モンテカルロ法によるイオン生成の数値解析、同軸円筒モデルでの電子数の解析から、つぎの結論を得た。感度を主に決定しているのは、真空計内の電子数である。電子数は電子軌道に大きく依存する。電子分布は真空計の中心軸付近が密である。真空計内の電子数の制限は、加速電圧が小さいときは電子どうしのクーロン散乱による軌道のずれによるアノードへの散逸が原因であり、加速電圧を大きくするにつれて散乱の断面積がちいさくなり、空間電荷の制限できまる飽和量に近づく。電子トラップ型真空計と電子非トラップ型真空計で、得られるイオン電流にそれほど大きな差がないのは、空間電荷で制限される電子数は真空計の大きさと各電極に与える電位できまってしまう、それらの値が両者で大きな違いがないからである。以上から、熱陰極マグネトロン真空計の感度を主に定める要因を特定することができた。

10^9 Pa 以下の極高真空領域での圧力測定は、加速器科学や表面物理学を支える真空工学の分野で重要な課題となっている。測定は、電離した空間気体分子の電流を検出することにより行なわれるが、このように極端に低い圧力下では主として二つの点で制約を受ける。一つは電子が陽極に衝突する際の電子刺激脱離に起因する現象で、このガス放出によるイオンが空間で生成されたものと区別できなくなることである。もう一つは、やはり電子の衝突の際に軟 X 線が発生し、これがイオンコレクタ電極を照射して光電子を放出させ、コレクタ電流が増加してしまう点である。

本論文では、ラファティにより提案された電場と磁場により電子を真空計内にトラップし、少ない電子電流でも感度が大きいことが期待される熱陰極マグネトロン真空計を取り上げ、上の二つの制約がどの程度まで低減できるかを研究したものである。同時に、このようなトラップ型真空計の感度がどこまで大きく得られるかを、そのトラップ機構を調べて考察したものである。

先ず、磁場を印加しない状態で、電子の加速電圧に対するコレクタ電流の変化を測定することにより、電子刺激脱離イオン電流と軟 X 線光電子電流とを分離して定量評価を行なった。この結果、軟 X 線光電子電流は電子電流の 10^7 倍であることが明らかになった。次に、酸素分子を陽極に吸着させてコレクタ電流を測定した実験から、酸素の飽和吸着量が数原子層程度で、電子刺激脱離イオン電流は上限を持ち、その値は電子電流の 10^5 倍程度であることが分かった。更にこの実験で、電子刺激脱離にも軟 X 線にもよらない電流がコレクタで観察されることを見いだした。現在のところ原因は明らかではないが、極高真空の測定技術を開発していく上での新たな問題点であることを指摘している。

真空計内部に電子がどの程度までトラップされるかを調べるため、磁場と加速電圧、及び電子電流をパラメータにしたイオン電流の測定を行なった。この結果、真空計内の電子密度についての飽和特性が実験的に明らかになった。そして、空間電荷の電子密度に与える影響、ラーマ半径と電子分布との関係などを考慮して、電子のトラップと散逸の機構を議論している。提案されたモデルは実験結果を完全には記述できていないが、定性的説明は可能である。更に、非トラップ型真空計の感度についても、ここで得られた電子の飽和密度を用いて検討している。

極高真空計測技術を開発する上で電子刺激脱離イオン電流と軟 X 線光電子電流の定量的評価と理解が現在要求されているが、トラップ型真空計ではそれらの測定例は殆どなく本実験は有用な知見を与える。又、コレクタで観察されたこれ以外の電流は、トラップ、非トラップ型を問わず極高真空測定に於て将来問題になると考えられ、その重要性の指摘は意義あるものと判断される。更に、真空計の感度を支配する要因として、トラップされる電子の飽和密度を挙げて系統だてた実験から議論している点は独創的であり、

非トラップ型真空計やイオンポンプの動作特性の解析など他への応用が期待される。

以上から、本論文は数物科学研究科加速器科学専攻の博士学位論文に値するものと結論した。

後藤信朗君に対する博士論文にかかわる専門分野ならびに基礎となる分野の学識を口述により試験した。例えば、各種電離真空計の特徴的パラメタ、固体表面上のガス分子の吸着及び脱離特性、超高真空ならびに極高真空作成技術、更に微小電流測定技術など真空工学に関する分野の質問を行なった。又、気体分子のイオン化断面積や電子の散乱過程についての基礎知識、静電ポテンシャルの計算方法などについても質問した。これらに同君は的確に答え、実験装置構築から測定解析に必要な専門から基礎に至る分野での知識と理解があることを示した。更に今後の研究の展開に関しても的確な指摘を行なった。