

準安定原子線刺激脱離計測高感度化のためのパルス化技術の研究

極限計測ユニット スピン計測グループ 山内 泰

1. 背景・目的

寿命の長い励起状態にある He(1s,2s)原子線は、熱エネルギーレベルの低速では、表面から真空側 0.2~0.3nm で反射されてしまうため、最外層の原子に選択的にエネルギーを付与できる理想的なプローブであり、表面吸着種を選択的に刺激して脱離計測する励起源に適している。これまでに低速準安定 He 原子線に最外層の吸着子を脱離させる能力があることが報告され、その高いポテンシャルが示されたが、同時に検出信号強度や脱離種情報が充分でないことも明らかとなっており、実用的計測法として確立するには、信号強度の増大あるいは信号の効率的な利用を図る技術開発が必須である。そこで、脱離イオンの検出効率が高いパルス法で必要とされる低速準安定 He 原子線パルス化の要素技術であるノズル・スキマー放電のパルス駆動ならびに機械式チョッパーを用いたパルス化技術に関する研究を行った。

2. 研究成果

放電試験用真空槽にカソードを内蔵する絶縁体ノズルと陽極を兼ねるスキマーとで構成される原子線源を構築し、ヘリウムガスの導入と大容量真空排気ポンプによる排気を行いながら、カソードとスキマー間の放電をパルス電圧の印加によってパルス化し、得られる準安定原子線の特性を解析し、パルス放電の安定化を図った。

陰極を内蔵した絶縁性ノズルとスキマー間で放電させることにより、準安定ヘリウム原子線が大きな強度で得られる。ノズル・スキマー放電法においてノズル内の陰極に針状電極が用いられるのは、針状電極先端に電界を集中させ、放電開始を容易にするためである。放電中のノズルでは、針状陰極の先端部から白く強い光を放つプラズマが、細く糸状に伸び、ノズル開口部まで達しているのが観測された。ところがこの針状陰極の表面積が小さいことが逆に動作範囲に限界を与え、大強度を得るための大電流駆動を困難にしているものと考えられる。そうであれば、放電の安定化と大電流化を図るために、陰極を表面積の小さい針状電極から面積の大きい電極に変更することが考えられる。ただし、ノズル・スキマー放電では 100 μ m オーダーのノズル開口部を通してプラズマが分布し、開口部での放電電流密度は 100A/cm² に達する。この高密度の放電を広い面積の電極で受けるには、中心部の放電電流密度が大きい中空陰極が適している。そこで、針状陰極のような電界集中による放電開始電圧の低減が望めない点も考慮しながら、ノズル・スキマー放電準安定原子線源の絶縁性ノズルに中空陰極を内蔵させた。

試作した原子線源の絶縁性ノズルは、耐熱性を考慮して石英ガラスとし、管のサイズは直径 20mm と大型のものである。ノズルの半球状の先端部に ϕ 0.5mm の開口を超音波加工により設けた。中空陰極には、耐熱性と熱伝導および加工の容易さから直径 10mm の Ta 管を用いた。この中空陰極をノズル内先端部の球面壁に接するように設置し、ノズル開口部に集中したプラズマが放射状に拡散しながら中空

陰極内部の壁面に到達する配置とした。中空陰極前端部に密度の高いプラズマが接すると中空陰極のスパッタリングによる損耗が大きくなるため、このようにスパッタリングを低減する配置を採用した。スキマーは、ステンレス製で開口部の直径を 0.7mm とした。このスキマーから 7mm の間隔をとってノズルを配置した。ノズル・スキマー放電の放電開始電圧を下げ、安定にパルス放電させるために、ノズルとスキマーの間に直径 2mm の開口を設けたトリガ電極を取り付けた。

1 μ F のコンデンサーを 3kV の定電流電源に抵抗を介して接続し、そのコンデンサーから半導体スイッチと 2k Ω の抵抗を介して中空陰極に放電電圧を供給した。トリガ電極は、抵抗を介して接地した。パルス放電中の電圧は、実質的にコンデンサーから供給され、時定数 2msec で減少することになるが、放電パルス巾を 100 μ sec 程度にすれば、電圧の減少は 5%程度にとどまり、放電に大きく影響しないと考えられる。

パルス放電中の放電電流は、陰極に直列につながる抵抗で安定化した。この抵抗による放電電流の安定化は、精密ではないが高速であるため、短いパルス巾 \sim 100 μ sec に比べても速く応答できる。パルス電流の平均値は、コンデンサーに充電する定電流電源の定電流動作によって、パルス巾 \sim 100 μ sec よりも遅い応答時間ではあるが精密に制御される。

ノズルを設置した真空槽は 800l/sec のターボ分子ポンプで、中間排気槽は 300l/sec のターボ分子ポンプで排気した。中間排気槽につづけて準安定原子線ビーム計測用の小型チャンバーを取り付け 60l/sec のターボ分子ポンプで排気した。中間排気槽の直径 0.2mm の開口を通過したビームは、計測チャンバー内の標的ステンレス板に衝突する。途中、荷電粒子や Rydberg 原子を取り除くために中間排気槽に偏向電極を設けた。この標的に流れる全電流を測定するとともに、標的から飛び出した 2 次電子の一部を二次電子増倍管に入射させてビームの TOF 計測を行った。

パルス巾 20 \sim 100 μ sec、繰り返し時間間隔 0.4 \sim 5msec を超える範囲で安定した動作が得られた。TOF スペクトルのチャンネル 0 付近には、放電で発生した紫外光が放電中に標的に到達したことに対応したピークあり、そのピークの形は放電の強さ、この場合はパルス放電電流の波形をほぼ反映したものであった。チャンネル 50 以降になだらかなピークがあり、準安定ヘリウム原子に対応したものであった。運動エネルギー分布の中心は、動作条件によって 70 \sim 110meV に変化し、分布の半値巾も 70 \sim 130meV と変わった。パルス放電電流は、平均放電電流のパルスデューティー比倍であり、デューティー比によって 0.2 \sim 1A と変わった。20 μ s/0.4ms と 50 μ s/1ms のスペクトルでは、パルス電流が同じではあるが、ピーク位置が多少ずれた。これはパルス巾が異なるために生じたものであり、パルスの中心時刻のずれ 15 μ s にほぼ一致した。パルス巾 50 μ s の 3 つのスペクトルでは、ピーク位置/半値巾ともに 70/70、90/80、110/130meV と大きくなった。これはパルス電流が 0.2、0.4、1A と大きくなるにつれ、ノズル開口部付近のプラズマ温度の上昇や、電子電流密度の上昇によって電子の衝突によるヘリウム原子の前方への散乱・加速が大きくなるためだと考えられる。

連続放電とパルス巾 100 μ s 繰り返し時間 2ms でのパルス放電のそれぞれの場合に計測チャンバーの標的に流れる全電流と放電電流を調べた。連続放電では、放電電流の増加に対してビーム強度が線形

よりも多少低い伸びを示した。パルス放電では直線的に増加し、放電電流 50mA 以上でもビーム強度が増加するものと思われる。連続放電に比べてパルス放電のビーム電流が 1/5 程度になっているが、パルスのデューティー比 1/20 を考慮した、連続ビーム換算強度ではパルス放電が 4 倍程度の強度となった。

ノズル・スキマー放電をパルス化して高密度の準安定 He 原子線を得ることができたが、ノズルにカソードを内蔵した構造で放電を維持するにはガス圧を高くできないため、ビームは断熱膨張による超音速ビームよりも拡散ビームに近い性質を持ち、なおかつ放電プラズマ中の電子との衝突により運動量をランダムに受けるため速度分布がかなり広く $v/\Delta v$ が 1 に近い。そのため、ビームをノズル・スキマー放電で一旦パルス形成しても、試料までの飛行時間 t に応じて、時間軸でのパルス巾が t に広がるのが課題である。試料上でのパルス巾を狭くするには、飛行時間（飛行距離）を短くするかあるいは速度分布を鋭く（ $v/\Delta v$ の値を大きく）する必要がある。飛行距離は、チョッパーを試料直近に配置することで短くすることが可能である。

従来から原子・分子線実験では、回転チョッパーが用いられてきた。しかしながら、真空中で円板をモーターで回転させる方式のチョッパーは、全体のサイズを小型化するのが難しく、試料の直近に設置するのが難しい。また、モーターの回転軸の軸受けを潤滑するグリースなどからの脱ガスによる真空劣化あるいは試料表面の汚染の問題もある。これに対して音叉チョッパーを用いれば小型化ならびに清浄な真空環境が実現できる。

音叉型チョッパーには、Electro Optical Products Corporation 社製の音叉 CH10 (65mm x25mm x18mm) を採用した。三個の中空コイルで磁極を取り付けた磁性ステンレス製音叉を励振する構成である。部品は全て超高真空対応で 120 度 C のベイキングが可能であり、共振の中心周波数は 300Hz であった。音叉の両腕にチョッパー板 7x10mm を付け、無振動時に閉じた状態にした。発振回路から 300Hz の交流電流を印加すると、ほぼ半周期の間、チョッパー板が閉じ、残りの半周期は正弦波に応じて平行な開口が開く。従って、単一の音叉では、デューティー比 1 : 1 のチョッピングができるが、TOF で必要な小さなデューティー比のチョッピングができない。そこで、CH10 を 2 式組み合わせでデューティー比の小さな短いパルスを生成した。一方のチョッパーが閉まりかけるタイミングでもう一方のチョッパーを開けることにより、チョッパーが、実効的に開いている時間を短くできる。(図 1)

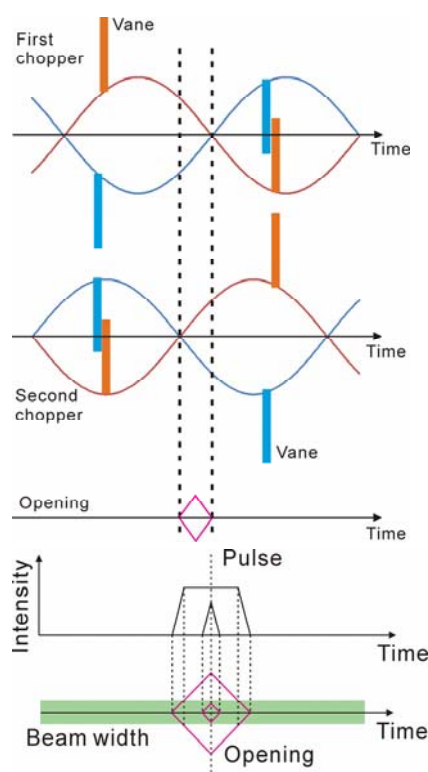


図 1.2 連チョッパーによるパルス
(上) 板の相対配置
(下) パルス波形

2連音叉チョッパーによる短パルスの発生には、2つのチョッパーの駆動周波数を厳密に一致させた上で、互いの位相を精密にずらす必要がある。そのために、位相同期回路を用いた駆動電源で2つの音叉チョッパーを動作させた。まず、主発信器で周波数を300Hzに固定した正弦波を発振させた。その正弦波の一部を取り出して移相器を通し、周波数は厳密に同じであるが位相を任意にずらした参照正弦波を得た。ついで、周波数を電圧で制御可能な副発信器で300Hz近傍の正弦波を発振させその一部を取り出して、位相検波器で参照正弦波との位相比較を行った。位相のズレに応じた電圧を位相検波器から副発信器に負帰還することで副発信器の発振正弦波の周波数と位相を参照正弦波に正確に一致させた。この主発信器と副発信器からの正弦波を電力増幅して2つの音叉チョッパーのコイルに供給した。

2連チョッパーの短パルスビーム生成の性能試験はレーザー光を用いて行った。赤色半導体レーザーのビームをナイフエッジスリットで $50\mu\text{m}$ 以下のシート状にして2連チョッパーの中心軸に沿って入射し、透過したビームをフォトダイオードで検出した。チョッピング挙動をシンクロスコープで記録した。位相シフトが144度ではパルス巾 $300\mu\text{s}$ の台形パルス、位相シフト168度でパルス巾 $100\mu\text{s}$ の台形パルスが得られた。台形のスロープは片側 $20\mu\text{s}$ 程度あり、位相シフト177度でパルス巾 $20\mu\text{s}$ の三角パルスとなった。さらに位相シフトを180度に近づけていくと(図2)パルス巾が小さくなると同時にパルス強度も減少したが、パルス巾 $5\mu\text{s}$ 以下のパルス波形も観測でき、音叉チョッパーによる低速準安定He原子線パルス化の実効性が確かめられた。

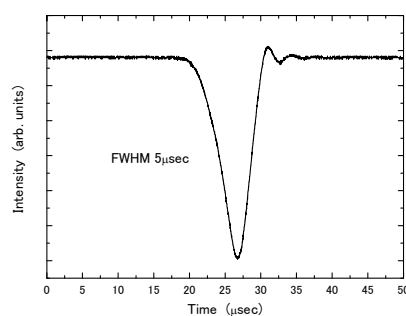


図2. 位相シフト180度近傍におけるレーザーパルス波形

3. 展望

これまでの研究によって励起原子源のパルス放電駆動と機械式チョッパーを併用すればパルス巾 $5\mu\text{s}$ 以下の低速準安定He原子線パルスを生成可能な見通しが得られた。原子線源を照射試料近傍に設置することは、荷電粒子を取り除くデフレクターあるいは、超高真空を確保するためのバッファ領域との干渉から困難であるが、機械式チョッパーは、超高真空対応であるため、試料近傍に設置することができる。従って本研究で達成したパルス巾は、実機条件でも充分達成可能である。脱離イオンのエネルギーが4eV程度で飛行距離が300mm程度であれば比電荷1の場合 $15\mu\text{s}$ 程度の飛行時間が見込まれ、脱離イオンのエネルギーが1eV程度であればその2倍以上となることから、パルス巾 $5\mu\text{s}$ 以下のパルスは良好な質量分離情報をもたらすであろう。