

平成 22 年 4 月 1 日現在

研究種目：若手研究(B)
研究期間：2008～2009
課題番号：20740165
研究課題名(和文) 多重反射型飛行時間測定式質量分析器のための高安定度高圧電源装置の開発
研究課題名(英文) Development of ultra stable high voltage supplies for multi-reflection time-of-flight mass spectrograph
研究代表者
SCHURY P. H (SCHURY P.H)
独立行政法人理化学研究所・低速RIビーム生成装置開発チーム・客員研究員
研究者番号：30462724

研究成果の概要(和文)：

不安定核の質量測定のための多重反射型飛行時間測定式質量分析器において、超高安定度の高圧電源群の開発が必須である。高精度 24bitADC と低温度依存性分割抵抗器による PID フィードバックによって質量分析器に用いる 7ch の出力を持つ高圧電源装置を開発した。参照となる高確度 DVM で測れる 1 kV の出力の長時間安定度において、5mV(RMS)の長時間安定度を達成できたことを確認した。

研究成果の概要(英文)：

For precision mass measurements of unstable nuclei using a multi-reflection time-of-flight mass spectrograph, ultra stable high voltage supplies are the essential prerequisites. We have developed such high voltage supplies using precision 24-bit ADC, low TC resistors and PID feedback system. The long-term stability of the high voltages was as slow as 5 mVrms for 1 kV supplies.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2009 年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：原子質量分析器、高精度高圧電源

1. 研究開始当初の背景

今日の原子核物理学は加速器と分離器技術の飛躍的な発展によって、普通には存在しない「不安定」原子核の研究が主戦場となっている。不安定原子核は、普通には存在しないものの、特異な性質を持つ物が多く、原子核の真の理解に適している。さらに、こんにち存在している多くの元素の起源において、不安定核が大変重要な寄与をしていることがわかってきた。不安定核は、まず生成して存在を確認することから始まるが、次にはその特性を測定する必要がある。中でも原子質量は、その存在や安定度を定義する最も重要な物理量である。

不安定原子核の精密質量測定は、ここ15年程の間の Penning トラップ質量分析器の発達によって大いに発展した。多くの不安定核が 10^{-7} 以上の相対精度で測定された。一方、その測定原理から、極短寿命 (0.1 秒以下) の原子核や生成率の低い原子核はそのような高い精度で測定することは困難である。また、そのような測定をするためには生成された不安定原子核は停止ないし低速ビームの状態であることが必要となり、最新式の不安定核生成法とはなじまない物であった。

本研究代表者らは、まず理化学研究所の入射核破砕片分離器 (RIPS) のような最新式の分離器から得られる高速の不安定核ビームを低速ビームに変換する技法を開発した。これによってあらゆる元素の不安定核が質量測定のような精密測定に供せられるようになった。さらに、極短時間 (数 ms) で高精度に質量測定できる測定器として多重反射型飛行時間測定式質量分析器の開発に取り組んできた。この方式では、イオンは2つの静電場によるミラーによって反射され、長い飛行距離を等時性を保ちながら飛行する。この静電場ミラーの電場を高精度に正しい値に、高安定に保つことが必須である。

2. 研究の目的

質量測定は、原子核物理学のみならず物性物理、化学、生物学のあらゆる科学の分野、さらには産業界も含めた工学の分野を含めても最も重要な測定の一つであり、多くの種類の質量分析器が開発されてきた。本申請者が所属する研究グループでは、短寿命不安定原子核の質量測定のために、多重反射型飛行時間測定式質量分析器 (Multi-Reflection Time-of-Flight Mass Spectrograph) を開発している。この分析器は、向かい合わせた1対の静電ミラーからなり、入射したイオンを多数回往復させ引き出した際の飛行時間の差異から質量を決定するものである。

この MRTOF 質量分析器の性能を決定する最も重要な要素は、静電ミラーの電位を精密かつ高安定に決定する高圧電源装置である。

本研究では、高精度・高安定抵抗器と 24bitADC を用いたフィードバック装置を開発し、1日程度の長時間にわたって 10ppm 以下の安定度を保つ電源装置を開発する。

3. 研究の方法

本研究では、MRTOF 質量分析器のための 2kV x5, 5kV x5, 10kV x2 の高安定度静電圧電源を開発する。具体的な構成は図Yref {fig:hvmodule} に示す通りであり、モジュール型の高圧電源ユニットを精密 DAC で制御して高電圧を質量分析器の電極に印加し、実際の電極の電位を精密電圧分割抵抗器と精密 ADC を用いて測定し、その値を PID フィードバック制御することによって高安定度を得るしくみである。

まず装置に用いる素子の評価、選択を行い、詳細回路設計、基板製作、組み立て、ソフトウェア開発を一通り行い、高安定化高圧電源装置を完成させる。最終段階では、実際の MRTOF 質量分析器のプロトタイプ装置に適用し質量スペクトルにおいて安定度の確認をする。

1) 電圧分配器と ADC

本装置の鍵となる部分は、高電圧分圧器 (Voltage divider) と、その値を精密に読み取る ADC (アナログ-デジタルコンバータ) である。この読みを基に、高圧電源モジュールの制御電圧をコントロールして電圧を一定に保つ。高電圧分圧器にもちいる抵抗素子として、温度特性の公称値が 0.14ppm/K と優れた特性を持つ金属薄膜抵抗器

(アルファ抵抗) を予定している。金属皮膜型抵抗器の不利な点は、高抵抗素子がつくりにくいことである。予備的な評価試験において、アルファエレクトロニクス社のハーメチックシール型の精密抵抗器で 1M オームの素子を特別に入手し試験した結果、公称値以上の性能が確認できた。しかし、非常に高価であること、熱的な絶縁度が高いので恒温槽に入れての使用にはあまり向かないことから、表面実装型の抵抗チップ (最大 60k オーム) を多数基板上に直列接続して製作する計画である。予備的に 50k オーム x20 素子の分圧器製作し試験したところハーメチック型と遜色の無い性能が確認できている。この試験に現在使用している DVM が 6.5 桁精度なので、測定精度と目標精度が近く信頼度の高い評価ができない。本申請で購入する 8.5 桁の DVM が、他のあらゆる部分の試験を含めて極めて有用である。

分圧された 5V 程度の電圧の精密測定には、最新の 24bit $\Sigma-\Delta$ ADC 素子を用いて多チャンネルの電圧計を自作する。基準電圧素子に MAXIM 社の MAX6325 (公称温度特性 2ppm/K) を用いる。予備試験において、Linear Technology 社の LTC2449 (8 differential inputs) を用いたところ $1\mu\text{V}$ 以下のノイズレベルが 10Hz のサンプルレートで得られた。但し、同素子は単極入力であること、高いサンプルレートを保つには 1 素子あたり多チャンネルである必要は無いことから、Cirrus Logic 社の

C6554 素子等の別の素子も評価する計画である。評価後、16ch 入力で同じ基準電圧を用いる高精度電圧計基板を製作して実機に用いる。この素子の制御と外部とのインターフェースには MicroChip 社の PIC を用いる。

2) 高圧電源モジュールとリップルフィルタ

高圧電源自身は市販のコッククロフトタイプのモジュールを用いる。松定プレジジョン社の HPMQ シリーズ (1kV および 2kV) は、公称リップル 1mV、安定度 15ppm/15min

(注：これを押さえるためにフィードバック制御する) と優れており、有力な候補である。質量分析器の電極におけるリップルやノイズを軽減するために、パイ型のフィルタを用いる。精密な静電圧の電源では、直列抵抗を用いるとそこを流れるブリーダ電流による電圧降下とそのドリフトが懸念されるので RC 型でなく LC 型が好まれる。しかし、LC 型で大きな時定数を得るのは難しい。本研究で製作する電源装置では、実際の電極の電圧を読み取ること、そのために使われるブリーダ抵抗が高精度高安定であることから、RC 型のフィルタを用いてもなんら問題無いので、RC 型を使って高いリップル阻止能を得る計画である。

3) DAC と PID 制御

高圧電源モジュールの制御は DAC (デジタルアナログ コンバータ) の電圧出力によって行う。一般に出回っている 16bit の DAC では最大のレンジをつかえたとしても最小 bit の変化率が 5×10^{-5} と、フィードバックすると 5ppm 以上変動してしまい、本件の目的には使えないことがわかる。本研究では、1) 20bit の DAC (例えば、Burr-Brown 社の DAC1220 素子) を用いるか、2) 16bit DAC を 2ch 使用して、片方を 1/100 程度にして高精度 OP アンプで混合して course と fine の 2 つの制御を行う、の 2 つの方法を検討している。後者は既に自分たちの他の装置で幾つかの実績があるが、1) の方法がより直線的であり、かつ新たなアンプの導入が不要なため、有力である。評価の後、16ch 分の出力を持つ DAC ユニットの製作する。DAC 素子の制御とインターフェースは PIC を用いる。ADC の読み取り値を基に制御 PC 上の PID (ソフトウェア) 制御を行い設定値を DAC ユニットに送り高電圧を安定化させる。このソフトウェア PID を用いた別のイオンビーム装置の 20kV の高圧電源のフィードバック試験 (但し、この電源は短時間の安定度が小さく、かつ DMM で読み取りのためレートは 2Hz 程度である) において、0.1V 以下の安定性を実現できている。

4) 温度制御

いかに温度特性が良くても、高安定度を保つには装置を恒温槽に入れることが重要である。本件では、最も大事な電圧分配器と ADC 部分を独立した恒温槽に入れて温度変動を 0.1K 以下に保つ。ここでもヒータとファンを

用いた対流式恒温槽を PID 制御で実現する予定である。他の部分も高圧電源モジュール部、DAC 部と独立に温度制御する。高圧電源モジュールは高い発熱体であり、他と独立であることが必要である。

4. 研究成果

研究計画で述べた機器の構成、使用デバイス、ソフトウェアの評価研究の結果、以下のような構成が最適であると判断された。

電圧分配器は、MRTOF のミラー電位構造を決定する分圧器についてはアルファエレクトロニクス社の 1M オームハーメチックシール型金属膜抵抗器を直列接続することになった。低抵抗値の同型抵抗素子を組み合わせることによって、イオン光学計算による所定の電位を正確に得られるようにした。さらに微調整用に低抵抗 (1k オーム程度) の半固定抵抗器を直列接続した。この素子の温度係数は 100ppm/K 程度と悪いが、抵抗値でスケールするので寄与は無視できる。その他のレンズ電源、スイッチ用独立電源群については、日本ファインケム社の超精密級高精度抵抗器 RU 型 (10ppm/K) の 100M オーム抵抗器とアルファエレクトロニクス社の 50k オーム乃至 20k オームのハーメチックシール抵抗器を用いて分圧してフィードバックに用いることにした。

ADC 素子は、ア) 1 秒程度以上のゆっくりした変動を押さえること、イ) 全ての高圧電源を単一の変換器と基準電源で制御すること、ウ) マルチプレクサによる切り替えによる無駄なサイクルがないこと、の理由からリニアテクノロジー社の 24bit ADC, LTC2449 を採用した。この ADC は 8ch の差動入力可能なマルチプレクサを備えており、7 台の高圧電源の電圧測定と恒温槽の温度測定を一つの素子で同条件で行うことができる。負入力となるレンズ電源についてはインスツルメンテーションアンプ (LT1167) で極性変換する。加速電源 (Vacc) の電圧は通常設置電位側で測定するが、高圧側の分圧抵抗の電位を高圧側から読むことによって同一性を確保した。

高圧電源モジュールは、イオン光学計算の検討からより高いエネルギーでより高い総合性能が得られる可能性があることを鑑み、5kV の出力可能な HPMR シリーズを使用することにした。公称リップルは HPMQ シリーズに比べて大きい、スイッチング周波数 (100kHz 程度) のリップルは実用上問題ないこと、容易に RC フィルタで軽減できることから妥当な選定である。

DAC 素子は、アナログデバイセズ社の AD5372 という 32ch-16bit DAC 素子を採用した。多チャンネルを 1 素子で備えているため極めて使いやすく、その他の用途へも多数既に使用している。先に述べたように 16bit の分解能では 10ppm の制御は不可能である。そのために、2ch 出力を精密 OP アンプ OP4117 によってバンドルして仮想 22bit DAC として作動するようにした。絶対分解能はレファレン

ス電圧や OP アンプ、DAC 自身の安定度に依存するが、あくまでフィードバック制御をする前提では ADC の読み取りが最終精度を決定するため DAC の性能はあまり問題とならない。フィードバックシステムの構成に関しては幾つかの試作を経て、最終的に採用した構成は以下のようになった。ADC と DAC+アンプはそれぞれ小型基板を起こして独立モジュールにし、インターフェースは SPI を用いた。SPI とホストとの接続には Nanoriver Technologies 社の Miniborad という USB-SPI インターフェースカードを採用し、間に SPI 分配器基板を製作し、複数の SPI 機器をそれぞれ絶縁して接続できるようにした。USB インターフェースは直接ホストに接続せず、一旦筐体内の Wafer-PC という産業用シングルボード PC に接続し、その上のオペレーティングシステム(Linux-RTAI)によって、ア) 正確な周期による AD 変換の連続動作とデータ蓄積、イ) ホストからの命令の調停(排他と同期)を正確に実行できるようにした。Wafer-PC から上流は Ethernet によって複数のホスト PC と接続できる。安定化のためのフィードバックは一つのホスト PC 上で Labview 言語で記述した PID 制御ソフトウェアで行うようにした。

精度、安定度に敏感な部分、ADC 基板、ADC 基板、分割抵抗器基板、分圧抵抗器基板のみを空気を遮断した容器に入れて、ペルチェ素子付きのブロワによって加熱・冷却および恒温槽内の温度の一樣化を行った。これら全ての素子群は高圧モジュールとともに-5kV(加速電圧に相当)に印可された高圧上に浮いている。設置側とのインターフェースは光 USB インターフェースと絶縁トランスを用いた。

全システムが完成し、その絶対電圧の安定度を別の高精度 DVM で測定した。1kV の出力に対して 5mV(RMS)の安定度が長時間にわたって得られることが確認できた。さらに、実際の MRTOF 質量分析器に電圧を供給して質量分解能を試験的に確認したところ、時間分解能 160,000 を 10ms 程度の飛行時間で達成できることが確認できた。

今後は、MRTOF のより高性能化に本研究で得られた精密高電圧電源装置がいかにか寄与していくかを系統的に調べ、短寿命核の精密質量測定に向けてさらなる高性能化をめざす。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

P. Schury et al., “Multi-reflection time-of-flight mass spectrograph for short-lived radioactive isotopes”, Eur.

Phys. J. A 42 (2009) 343-349. (査読有り)

[学会発表] (計 1 件)

P. Schury, et al., “Multi-reflection Time-of-Flight Spectrograph, the 3rd Japan-US Joint Physical Society Annual Meeting, 15 Oct. 2009, Waikoloa, Hawaii, USA.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

SCHURY P. H (SCHURY.P.H)

独立行政法人理化学研究所・低速 R I ビーム生成装置開発チーム・客員研究員

研究者番号：30462724