

氏 名	すぎ 杉 村 たか し 志
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2436 号
学位授与の日付	平 成 14 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学位論文題目	三次共鳴と RF ノックアウト法を併用した遅い取り出しによる電子線パルスストレッチャーの研究

論文調査委員	(主 査) 教 授 野 田 章 教 授 西 川 公 一 郎 教 授 笹 尾 登
--------	--

論 文 内 容 の 要 旨

電子線形加速器からの出力ビームは超伝導を用いた CW 運転の加速器の場合をのぞけば、加速空洞の冷却や電源の容量の制約から、「一定時間の内の出力ビームの利用できる割合」を示す「デューティーファクター」が一般的に言って小さく抑えられており、京都大学化学研究所附属原子核科学研究施設の 100MeV、S-band 線形加速器の場合も最大の繰り返しとビームパルス幅がそれぞれ 20Hz および 1 μ sec と限られているため、最大でもビームのデューティーファクターは 2×10^{-5} と極めて小さい。この状況は高いピーク電流のため、実験を行う際の検出器からの信号が容易にパイルアップを起こす状況をもたらすため、ビーム強度を低く抑えた運転を余儀なくされ、実際の実験に使用できる平均強度を低く抑えざるを得ない状況を現出している。

このような状況を改善するため、申請者はこの 100MeV 線形加速器の後段に放射光源として設置されていた電子蓄積リング KSR をパルスストレッチャーとして使用し、線形加速器からの出力ビームを KSR に入射した後、三次共鳴と RF ノックアウト法を併用した遅い取り出しを用いて KSR リングからゆっくりと取り出すことにより、ビームのデューティーファクターを 90% 以上に改善する手法に関する研究を行った。

本研究で KSR を電子ビームのパルスストレッチャーとして用いるために使用された装置は(1)三次共鳴形成のための六極電磁石、(2)ベータトロン振幅増大のための RF ノックアウト電極、(3)KSR リングのアーチャーミニマムをビーム入射時はインフレクターポジションに、ビーム取り出し時には静電セプタム入口に形成することを目的とする、時間変化するキックアングルを生成するインフレクターキッカーと静的な閉軌道形成システムから構成される軌道補正システム、(4)静電セプタム及びセプタム電磁石から構成される取り出しビームをリングの外に導くためのチャンネル、から構成されている。こうしたシステム全体に関して、計算機コード MAD を駆使したビームトラッキングを遂行し、各構成要素の最適化を行った上で、静電セプタム及びセプタム電磁石をこの目的のために新たに設計・製作し、その性能評価を行った上で、KSR リングに設置している。この過程で遅い取り出しにおいてはビームの取り出し効率、静電セプタムのセプタム厚と取り出し時のビームのターンセパレーションの比で決定されるため、Ti の薄膜を用いることによりセプタム厚を 0.1mm と極力薄く抑える工夫がなされている。また、セプタム電磁石は放射光源としての KSR の使用と両立させる目的から超高真空仕様となっており、セプタムコイルを真空系の外に設ける設計を採用している。

本研究で用いている遅いビーム取り出しでは、リングをビームが周回する時間に比して 6～8 桁長い時間にわたってビームを取り出すため、非線形磁場を用いることにより、振幅が一定値を超えるビームが発散解となる三次共鳴を利用しているが、最終的にリング中の全てのビームを取り出すために従来採用されてきた方法では、取り出しが進行するにつれて、振幅のより小さなビームも取り出すためにベータトロン振動の安定領域と不安定領域の境界であるセパトリックスを縮小させる手法を用いていたが、この方法の場合取り出しビーム角度が取り出しの始めと終わりで変化するため、時間積分したビームサイズが大きくなると言う難点が存在する。本研究では、上述のセパトリックスの大きさは一定に保ち、ベータトロン振

動と共鳴する周波数を有する横方向の高周波電場を印加する事により、セパトリックスの中心付近に存在するベータトロン振幅の小さなビームに対しても、徐々にそのベータトロン振動の振幅を増大させ（RF ノックアウト法）最終的に不安定領域に導く手法を用いている。この方法の場合、セパトリックスの大きさは不変に保たれており、取り出しの進行につれたビーム角度の変化が原理的に存在しないと言うメリットがある。また、印加する RF のパワーの調整により取り出しビームの時間構造を容易に制御できる。実際に、本研究では取り出しビームチャンネルのセプタム電磁石の下流に設置したプラスチックシンチレータを用いた観測により、この RF パワーを 1.9W から 11mW まで変化させることにより、60MeV の電子ビームのスピルを 0.2秒から 40秒まで制御可能なことを実証している。

ビームの取り出し効率の定量的評価を目的として、本研究では二次電子の発生の抑制のための水室を有する Faraday Cup を製作し、電子線形加速器からの出力ビームを用いた較正を行った上で、取り出しビーム強度の測定を行い、リング中に設置されている Direct Current Current Transformer によるリング中の周回ビーム強度の計測と併せて、取り出し効率の評価を行い、50%以上の取り出し効率が実現されていることを確認している。

本研究により、従来 Radiation Damping に対する懸念もあり、イオンビームに対してのみ用いられてきた RF ノックアウトを併用した三次共鳴による遅い取り出し法が、100MeV 以下の電子ビームに対しても適用可能であり、RF ノックアウトのための横方向 RF のパワーの制御により、ビームスピルが 0.2秒から 40秒にわたって制御可能であること及びこの方式により 90%以上のデューティーファクターの実現が可能であることが示された。

論文審査の結果の要旨

申請者は、S-band 電子線形加速器の最高エネルギー 100MeV の出力ビームのデューティーファクターを最大で 2×10^{-5} の状況から 50%を越える値にまで改善する目的から、放射光源として存在していた電子蓄積リング KSR をパルスストレッチャーとして活用する手法の開発を進めてきた。

電子ビームのパルスストレッチャーは内外にいくつかの例が存在したが、何れも全てのビームを取り出す目的のため、リング中を周回しているビームの運動の安定領域と不安定領域の境界であるセパトリックスのサイズを取り出しの進行につれて縮減していく手法を採用していた。これに対して、申請者は扱う電子ビームのエネルギー領域が 100MeV 以下と比較的低いこと及びこのエネルギー領域では Lorentz factor を考慮に入れても電子の質量が、非相対論的なエネルギー領域のイオンと比較しても一桁程度小さいため、電場による偏向がイオンに比して効果が大きいことを指摘して、従来イオンビームに対してしか用いられてこなかった「RF ノックアウト法を三次共鳴と併用する手法」を電子ビームにも初めて適用した。この方法は従来の方法に比して、取り出しビームの角度が時間的に変化しないため、実験の標的位置での時間的なビームの位置変化を生じない特徴を有しており、この特徴は蛍光板を用いた観測により本研究において実験的に確認されている。

申請者は、二次電子発生を抑えて取り出しビーム強度の絶対値を測定する目的で、前方に水室のある Faraday Cup の製作をおこない、これを線形加速器の出力ビームを用いて較正したうえで取り出しビーム強度の測定に使用し、DCCT による周回ビーム強度の測定と比較して、ビームの取り出し効率を定量的に評価している。KSR の場合は放射光源としての使用との両立の関係から、ビームの入射と取り出しを同一直線部の近接した場所で遂行しているため、ビーム取り出しの第 1 セプタムである静電セプタムのセプタムフォイル位置の選択に厳しい条件が存在するが、申請者は計算機コードによるビーム軌道のトラッキングとビーム位置モニターによるリング中のビームの閉軌道の実測の活用により、比較的ターセパレーションの大きな位置にセプタムファイルを設置してビームを取り出すことに成功し、先に述べた他の手法と比しても遜色のない 50%を越える取り出し効率を達成している。

また、シンチレーションカウンターを用いた取り出しビームの時間構造の測定により、RF ノックアウトの横方向 RF パワーの 1.9W から 11mW への変化により、60MeV の電子ビームのスピルを 0.2秒から 40秒にわたって可変出来ることを実験的に示し、十分なビーム入射の繰り返しが達成可能な条件のもとでは、ビームのデューティーファクターとして、これらの時間幅にわたって、90%以上が実現できることを示している。

申請者を中心として行われた本研究により、以下の知見が得られた。

1. RF ノックアウト法を三次共鳴と併用する遅い取り出し法はイオンビームと同様電子ビームにも 100MeV 程度以下の低

いエネルギー領域では、十分可能であり、取り出し効率もパルスストレッチャーとして実用的な50%を越える値が達成可能である。

2. この手法に用いられる RF ノックアウトのための横方向 RF 電力を変化させることにより、0.1秒のオーダーから数十秒に及ぶビームスピルの制御が可能であり、90%以上のビームのデューティーファクターが実現できる。

よって、本申請論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。

主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問した結果、合格と認めた。