

[14B-02]

DEVELOPMENT OF PULSED MeV POSITRON BEAM LINE (II)

M. Maekawa, S. Okada and H. Itoh

Japan Atomic Energy Research Institute, Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment
1233 Watanuki, Takasaki, Gunma 370-1292, Japan

Abstract

A high energy (1MeV) pulsed positron beam line has been developed for positron annihilation lifetime spectroscopy measurements of materials under extreme conditions. As a result of its performance tests using an electron gun, additional short pulses arising from insufficient chopper driving were observed in the time structure of accelerated beams. A high quality beam with single fine pulses is expected to be formed by improving the chopper system.

高速短パルス陽電子ビーム形成装置の開発II)

1. はじめに

陽電子消滅寿命測定法 (PALS) は材料欠陥の種類や量を非破壊かつ高感度に測定でき、物性研究における有力なプローブの一つに挙げられる。特にパルス陽電子ビームを用いた PALS では、試料を線源と密着させて陽電子を直接試料に注入する従来方式と比べ、線源と試料が非接触であるため測定条件を幅広く設定することが可能になる。さらに高エネルギー陽電子ビームを用いると真空外へのビーム取り出しが容易となるため、空気中などの任意の雰囲気中や高温・応力下にある試料の測定にも適用でき、半導体中の欠陥集合過程や繰返し応力下での金属中のボイド形成過程を解明するのに極めて有効である。我々はそのような高時間分解能陽電子ビームの形成をめざし、高速短パルス陽電子ビーム形成装置の開発を行ってきた¹⁻²⁾。

陽電子ビームを用いた PALS は、ビームを時間的に圧縮 (バンチング) させ、パルスビームとすることで物質中に陽電子が入射した時刻を明確化し、消滅ガンマ線を検出するまでの時間差を検出することで測定が行われる。高精度な PALS のためには入射時刻の時間ジッターが小さく (パルス幅が狭く)、バックグラウンドが低い (S/N 比が高い) ビームが必要となる。高エネルギービームを直接パルス化するのは容易ではないため、本装置では ²²Na 線源からの低速陽電子ビームをバンチャー (SHB) にて速度変調を掛けバンチングした後、RF 空洞

を用いて加速する。低速陽電子ビームの輸送エネルギーは 1000eV とし、周波数 2856MHz のクライストロンを RF 源とする定在波型加速管を用いて最大エネルギー 1MeV にまで加速する。加速管内で発生する放電電子は試料に照射損傷を与える可能性があるため、磁場を用いたフィルター部を設置して、陽電子-電子の分離とエネルギー弁別を行う。またビーム集束のため、磁気フィルター前後に Q マグネットを設置している。

これまでに電子銃を用いた動作試験を行い、最大ビームエネルギー 1 MeV まで 5 % 程度のエネルギー広がり度で加速でき、さらに 1 mm 以下のビーム径へと集束できることを確認した。エネルギースペクトルとビーム径は高エネルギー陽電子ビームとしては十分良質ではあるが、高精度 PALS 測定のためには陽電子のシングルファイナパルス化が不可欠である。ビームパルスの時間構造を把握する目的で、高速オシロスコープ (Tektronix TDS694C, 3 GHz) を用いてビーム時間構造の直接観測を行った。

2. ビーム時間構造の測定

パルス幅が狭く、高 S/N 比のビーム形成には、低速ビームのバンチング挙動を把握することが重要であるため、はじめに低速ビームの時間構造を測定した。図 1-a は電子銃のみのビーム電流を示している。この状態から SHB を動作させると図 1-b の形状へと変化した。SHB は

178.5MHz のサイン波を用いてビームに速度変調を掛けるため、この変調に対応して 5.6ns 周期でビームがバンチングされていることが確認された。しかしパルス幅は FWHM で 1ns 程度あり、S/N 比も 7:1 程度にとどまった。これらを改善するため、SHB の不要位相へのビームの入射を制限するビームチョッパーを設置した。チョッパーは 3 枚並べた金属メッシュで構成され、中央のメッシュの電位を変化させることでビームの断続を行う。高効率なチョッピングを行うためには電位の変化幅を大きくし、ビームの時間構造を崩さないためには電位を矩形波的に変化をさせることが望ましいが、今回は電位変動幅を優先した。このためパワーアンプを用いて 178.5MHz のサイン波を増幅し、これにオフセット電位をかけることでビームのチョッピングを行った。チョッパーを動作させて得られた波形が図 1-c である。パルス幅についてはあまり変化はみられなかったが、S/N 比はおおよそ 30:1 まで向上した。

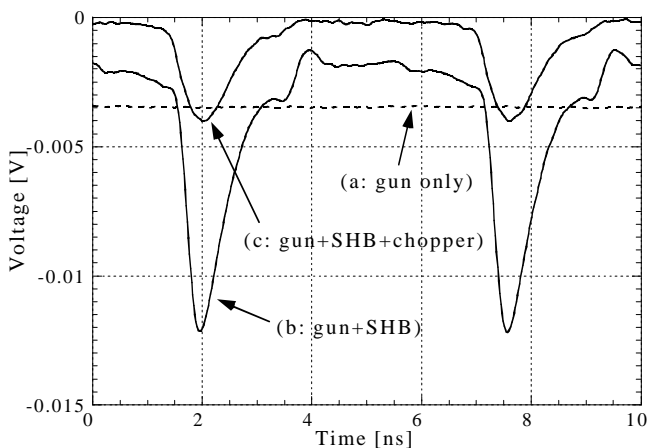


図 1. 低速ビームのバンチング挙動

このバンチングビームを加速管に投入し 500 keV に加速した時のビーム時間構造を測定すると、低速ビームの時間構造を良く反映する結果となった。加速管のみを動作させた状態(図 2-a)では幅 150 ~ 200 ps のファインパルス列(350 ps 周期)が観測された。これは 2856 MHz(1周期 350 ps)の RF を用いた加速の効果であると考えられる。SHB を動作させると 5.6 ns 周期にパルス化された成分に、RF 加速による幅 150 ~ 200 ps のファインパルス列が重畳したものがビームの時間構造として取

得できた(図 2-b)。パルス幅は FWHM で 2 ns 弱と広く、複数の加速位相にまたがってサテライトパルスの形成が見られ、これは PALS における擬似寿命成分となりうる。擬似したサテライトパルスがバックグラウンド領域にも観測され、測定精度を下げる要因となる。チョッパーを駆動させても(図 2-c)、擬似寿命成分となるサテライトパルスが残存しており、この除去が今後の課題である。またバックグラウンドとなる領域のサテライトパルスについては、加速管からの放電電子に原因すると考えられ、陽電子を加速した場合には磁気フィルターで除去できると予想される。

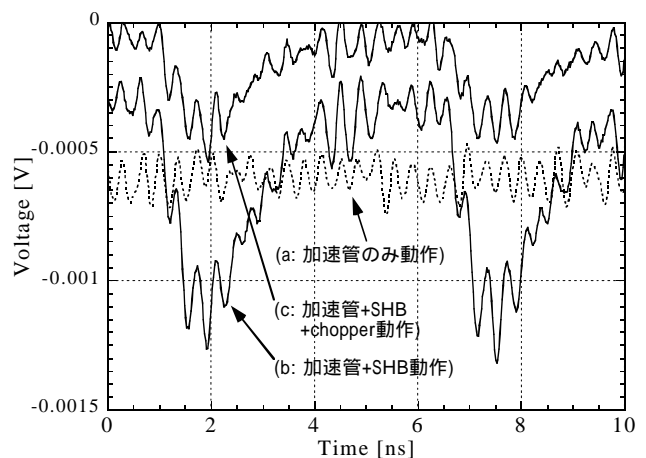


図 2. 加速ビームの時間構造

3. ビーム時間構造改善の検討

高精度 PALS のためにはサテライトパルスを除去し、5.6 ns 周期のシングルファインパルスを形成する必要がある。低速ビームの段階で S/N が高く、パルス幅が 500ps 程度のパルスビームを形成できれば、加速管を通すことによりシングルファインパルスを形成できる。現有のチョッパーではサイン波を用いているため開時間を調節することが出来ず、バックグラウンド成分の低減には有効であるが擬似寿命成分は削除できない。SHB によるバンチングの効率を上げパルス幅を短くすることで擬似寿命成分の低減が図れるが、そのためには入射する低速ビームのエネルギースペクトルの広がり小さいことが要求される。低速ビームのエネルギースペクトルを実測したものが図 3-a である。設定された 1000eV の輸送エネルギーに対し 1060eV 程度までスペクトルが

伸びている事が確認された。これはチョッパーに用いている金属メッシュが粗いため、メッシュワイヤー間の空間電位がメッシュへの印加電圧よりも低くなり、チョッパー内電位が空間的に分布を持つことに起因する。このような電位分布の下では、単色ビームを透過させても通過したビームのエネルギースペクトルは電位分布を反映して広がってしまう。すなわちメッシュの空間電位分布はビームのエネルギーに対する透過効率に深く関係することになる。示している。現有チョッパーのメッシュに1000Vを印加した場合の空間電位分布を数値計算により求め、ビームの透過効率を計算した結果を図4に示す。

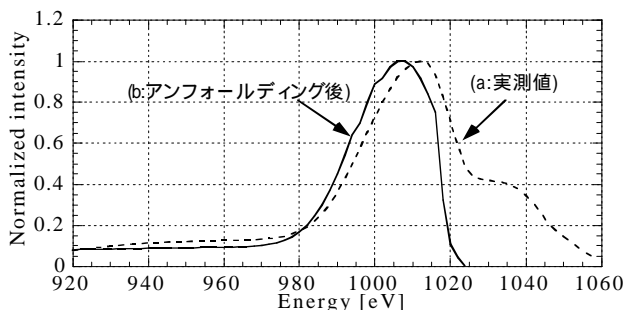


図3. 低速ビームのエネルギースペクトル

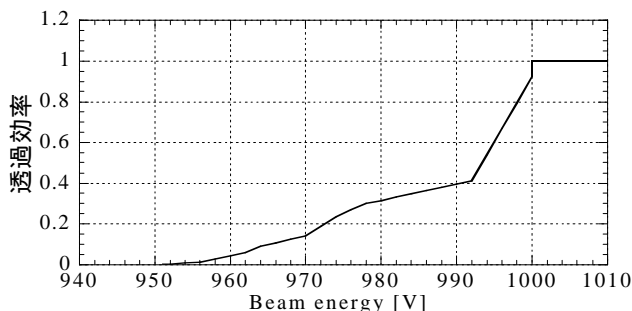


図4. 1000V 印加したメッシュのビーム透過効率

この透過効率をもとに、測定されたエネルギースペクトルをアンフォールディングしチョッパーのメッシュ内での電位分布を1000V一定とした場合のエネルギースペクトルを計算したものが図3-bである。メッシュの電位分布はSHBに対する実効的なエネルギースペクトルを悪化させるため、チョッパーのメッシュをより細かくすることで実効的にエネルギースペクトルを改善することが可能となり、SHBでのバンチング効率の向上が期待される。図3-aのエネルギースペクトルを用い低速ビームのバンチング挙動を数値計算したものが図5-aである。実測値

(図5-b)と比較すると良い一致を見た。さらに電位分布の影響を無視し図3-bのエネルギースペクトルを用いて計算した結果が図6である。この結果は、チョッパーの電位分布の改善により500psのパルス幅と高S/N比を得ることが出来、シングルファインパルスが形成できることを示している。

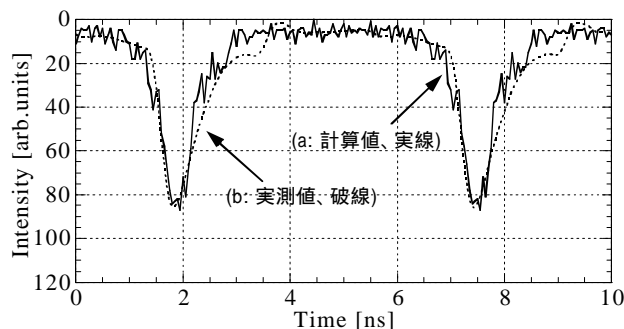


図5. メッシュ電位分布の影響がある状態での低速ビームバンチング挙動の計算結果

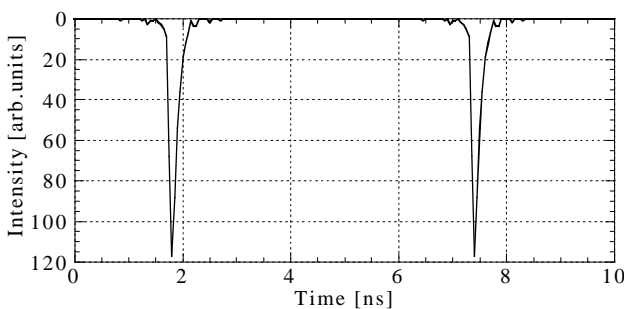


図6. メッシュ電位分布の影響がない状態での低速ビームバンチング挙動の計算結果

4. まとめ

高速短パルス陽電子ビーム形成装置で発生したビームの時間構造を高速オシロスコープを用いて測定した。この結果、高精度 PALS を阻害するサテライトパルスが観測されたが、チョッパーのメッシュを細かいものに変更し、空間電位分布の影響を取り除くことでシングルファインパルスが達成できる見通しが得られた。

参考文献

- [1] M. Maekawa *et. al.*: Proc. 24th Linear Accelerator Meeting in Japan (1999) 48.
- [2] M. Maekawa *et. al.*: Proc. 12th Symp. Accelerator Science and Technology (1999) 87-89.