

[F18p04]

Short-Pulsed Slow Positron Beam Production Using S-Band Electron LINAC in ISIR

Mutsumi Tashiro, Tomohiro Yamaguchi, Yoshihide Honda, Norio Kimura,
Takahiro Kozawa, Goro Isoyama, Seiichi Tagawa

Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
8-1, Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan

Abstract

The short-pulsed slow positron beam has been constructed from the intense slow positron beam with the S-band electron LINAC. The positrons are bunched by the periodic electric potential optimized by the arbitrary waveform generator, not using an RF power. The pulse time width can be spread because of the energy distribution of the initial positron beam, the displacement of the potential on the electrodes, and so on. The consideration and the examination of the pulsing system for the improvement of the problems are reported.

産研 S バンド電子ライナックを用いた低速陽電子ビームの短パルス化

1. はじめに

陽電子はナノメータプローブとして、金属の欠陥や高分子の自由体積を評価できる有力な手段として注目されている。その一つに陽電子消滅寿命測定法があり、放射性同位元素を用いた白色の陽電子線が従来から利用されている。しかし、この場合陽電子のエネルギーが高く、その分布も広いので、薄膜材料に応用するためには低速陽電子ビームが不可欠である。これを用いて陽電子の寿命を測定するため、我々は低速陽電子ビームの短パルス化を進めている。現在、阪大産研 S バンドライナック (最大エネルギー 145 MeV、ピーク電流 400 mA、繰り返し 30 pps) から得られる低速陽電子ビームは、初期ビーム強度 $\sim 10^7$ e⁺/sec、パルス幅 ~ 2 μ sec、繰り返し 30 pps であり、ビームのエネルギー拡がりはおおよそ 440 eV である。これを磁場中リモデレーターにより陽電子を再放出させることにより、強度 $\sim 10^6$ e⁺/sec でエネルギー拡がりをおおよそ 4 eV に抑えることに成功している^[1]。このビームを短パルス化し、強度としてデータを 100 万カウント蓄積するのに数十分程度、時間分解能として従来の陽電子消滅寿命測定装置の一般的な分解能である 200 psec 程度の性能をもつ、コンパクトな装置の開発を目指している。今回その設計・開発

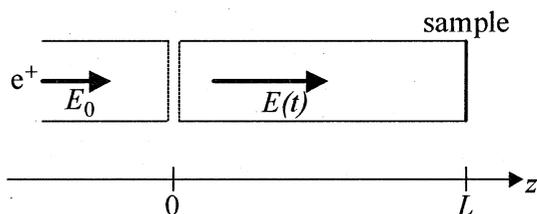


図 1 陽電子ビームの短パルス化

の現状について述べる。

2. 短パルス化の原理

任意波形発生器(AWG)を用いた短パルス化の原理は次の通りである。ビーム軌道中に電極を配置し、その進行方向と平行に時間的に変動する電場を周期的に発生させ、先行する陽電子を減速、後続のものを加速させることにより、試料部において陽電子を時間的に収束させる。図 1 のように、エネルギー E_0 を持ち連続的に飛行する陽電子が位置 $z=0$ ($t<0$) において電位差 V で加速され、時刻 $t=0$ にターゲット位置 $z=L$ において収束させるとする。このとき、加速後の陽電子の持つべきエネルギー $E(t)$ は、陽電子の質量を m 、素電荷を e とすると $E(t)=mL^2/(2et^2)$ であり、電極に与えるポテンシャル V は次式で与えられる。

$$V = -\frac{mL^2}{2et^2} + E_0 \quad (1)$$

この式からわかるように、RF 電源で広く用いられるサインカーブよりも、 t^2 の関数を用いた方がポテンシャルの周期的な変化の中でパルス化に有効な部分をより広く取ることができ、効率がよい。

3. パルス幅の評価と改善

この方法で短パルス化を行うと、試料部におけるパルスの時間幅は原理的には 0 になるはずである。しかし、初期の陽電子ビームのエネルギー拡がりや電極に与える電位の理想値からのずれ、ビームラインに発生している不均一磁場や電場などによって、現実には時間的に拡がりが生じる。以下この要因とその対処法について述べる。

初期ビームのエネルギー拡がりを $\pm\Delta E$ とすると、パルスの時間的拡がり Δt は次式で表される。

$$\Delta t = t \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 \pm \Delta E/E}} \right), \quad \left(E = \frac{mL^2}{2et^2} \right) \quad (2)$$

磁場中再放出後のビームのエネルギー拡がりは $\sim \pm 2 \text{ eV}$ である。 $E_0=30 \text{ eV}$ 、 $L=1 \text{ m}$ としたとき、陽電子に与えるポテンシャルの最大変位をおよそ 100 V とすると、式(2)から Δt は 1 nsec を大きく越えてしまい、要求とする時間分解能 ($\sim 200 \text{ psec}$) を満たす性能が得られない。そこで、 ΔE を極力小さくするために、パルス化装置の直前に陽電子蓄積部を設置し、ビームの DC 化を行う。陽電子蓄積部の電極構造の概略とそれらに与えるポテンシャルの時間変化を図 2 に示す。ライナックから得られる陽電子ビームは $\sim 2 \mu\text{sec}$ のパ

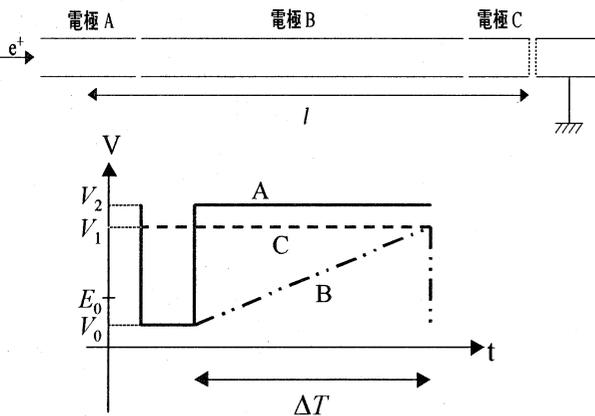


図 2 陽電子蓄積部の電極と与える電位

ルス幅で 30 pps であるので、蓄積部のゲート電極 A の電位を $\sim 2 \mu\text{sec}$ の間だけ下げて陽電子を注入し、その後 $\sim 33 \text{ msec}$ かけて B の電位を C に近づけていく。このとき蓄積部から出てくる陽電子のエネルギー拡がり ΔE は、陽電子が蓄積管 B 内を往復する間に上昇する B の電位変化分と考えることができる。蓄積部の長さを l 、電極 B の電位を V_0 から V_1 に変化させるとし、またその時間を ΔT とすると、 ΔE は次式で与えられる。

$$\Delta E = \frac{2l}{\sqrt{2e(E_0 - V_0)}} \cdot \frac{V_1 - V_0}{\Delta T} \quad (3)$$

ここで $E_0=30 \text{ V}$ 、 $l=2 \text{ m}$ 、 $V_0=20 \text{ V}$ 、 $V_1=50 \text{ V}$ とすると、蓄積部通過後の陽電子のエネルギー拡がり ΔE は 2 meV 程度となる。このとき Δt は数十 psec 程度となり、要求を満たすものとなる。

短パルス化の際に電極に与えるポテンシャルは AWG で作り出された信号を増幅器で増幅して与えられる。このときの電位が理想値からずれると、それがパルス時間幅の増大につながる。

図 3(a) は AWG(Sony-Tektronix AWG 510; サンプ

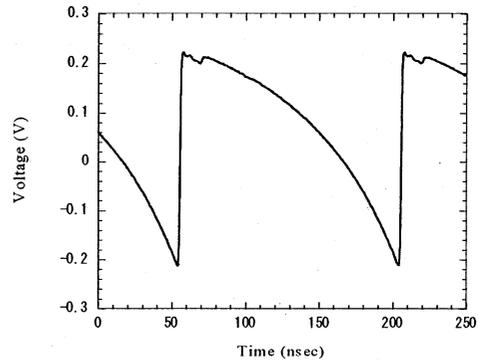


図 3(a) AWG の出力波形

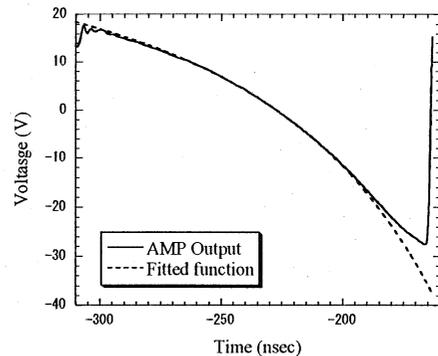


図 3(b) 増幅器の出力波形

リング周波数 1 GHz; 電圧分解能 10 bit)の出力波形である。これを増幅器(Thamway T142-4029A; 100 k-350 MHz; 10 W)により増幅したものが図 3(b)である。図 3(b)の波線は理想関数を表しており、2 つの波形の差によるパルスビームの時間的広がりをもとに式(2)を用いて計算を行った。ただし、ここでは ΔE を電位の理想値からの変位 ΔV に置き換えている。すると $-260 < t < -210$ nsec の 50 nsec の間の領域でチョッパーによりビームを切り出せば Δt が 300 psec 程度になることがわかった。時間 t をより 0 に近いところでバンチできるようにすれば、式(2)よりわかるようにさらに Δt を小さくでき、200 psec を下回ることができると考えられる。

実際に電位を与える電極はほぼ 1 m (直径 6 cm) の管であり、真空用配管 (内径 10 cm) との間に電気容量が存在するため、波形の高周波数成分が除去され出力波形に歪みが生じる。これを改善するため波形の最適化を行った。図 4(a) は実際に電極に与えた波形を示しており、これによるパルス幅の影響を表したものが図 4(b)である。これを見ると、 $-227 < t < -187$ nsec のおよそ 40 nsec の領域で Δt が 150 psec 程度となる。このことから、この方法による短パルス化が可能であることがわかる。

他にパルス幅を増大させる要因としては、ビーム軌道上の磁場や電場の不均一性による影響が考えられる。軌道計算により、現在のビーム径で短パルス化装置にヘルムホルツコイルを用いた磁場であれば、ビームラインの中心軸上とそこから 1 cm の位置における陽電子の飛行時間の差は数十 psec 程度であることが求められた。また、そのような磁場中で、時間 t によって異なる加速電場中を通過した陽電子の飛行時間と理想値との差も数十 psec 程度となり、先に述べた電位のずれによる Δt への影響に比べるとさほど問題がないことがわかった。

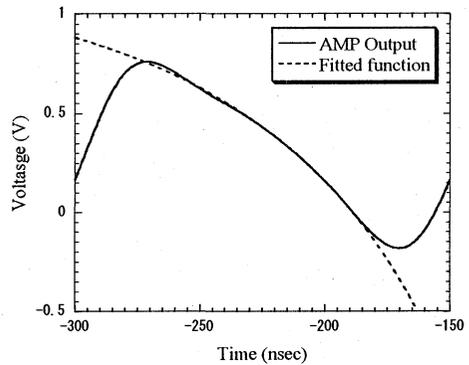


図 4(a) 電極における波形

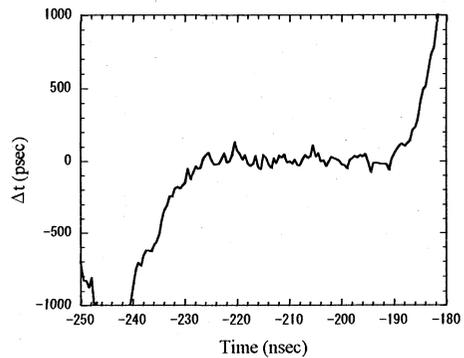


図 4(b) パルス幅への影響

他の要因には、完全にハードウェアに依存するものとして AWG の出力波形とトリガーとのジッターがあるが、これは 50 psec 以下であることが確認された。

4. まとめ

以上、様々な要因におけるパルス幅への影響とその対処方法を述べた。これに基づき、今後実際に装置を組み上げ陽電子の蓄積やパルス化の実験、パルス幅の評価を行う予定である。

[1] Y. Honda *et al.*, "Present Status of Slow Positron Facility Based on the S-Band LINAC in ISIR, Osaka Univ.", *Proceedings of the 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan*, 255 (1997).