

電子線形加速器ベース低速陽電子ビームの短パルス化による陽電子寿命測定システムの開発

田代 睦¹⁾、菅田義英、山口倫宏、寺島孝武、宮本浩次、田川精一

大阪大学産業科学研究所

〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1

概要

阪大産研 S バンド電子ライナックから得られる高強度の低速陽電子ビームを短パルス化し、陽電子寿命測定装置を開発してきた。これにより、高分子薄膜材料中のナノメートルサイズの空隙を試料の深さ方向に対して評価することなどが目的である。装置は陽電子蓄積部、チョッパー及びバンチング部からなる。蓄積部で陽電子を準連続ビーム化しかつエネルギー広がりを小さくする。その後のバンチング部で適当な高周波電場をかけることにより陽電子の速度変調を起こし、試料部で時間空間的に収束させる。バンチング波形や検出器の配置などを調整することにより時間分解能と S/N が向上し、陽電子寿命測定システムを構築することができた。

1. はじめに

低速陽電子ビームは薄膜材料の極微構造評価に有力なツールである。陽電子寿命を測定することにより高分子材料のナノ空隙サイズの評価が可能となる。薄膜材料での陽電子寿命を測定するため、我々のグループでは阪大産研の S バンド電子ライナックから発生した低速陽電子ビームの短パルス化を進めてきた。要求される時間分解能は数百ピコ秒程度であるため、バンチの時間幅も同程度にしなければならない。発生部から得られる陽電子は、電子ライナックの特性上、 $\sim 2 \mu\text{s}$ のパルス幅で繰り返し 30 pps であり、 $\sim 1 \text{ keV}$ の輸送エネルギーで $\sim 440 \text{ eV}$ のエネルギー拡がりを持っている。エネルギー拡がりを抑えるため、これまで磁場中再放出装置を導入して更なる低速・

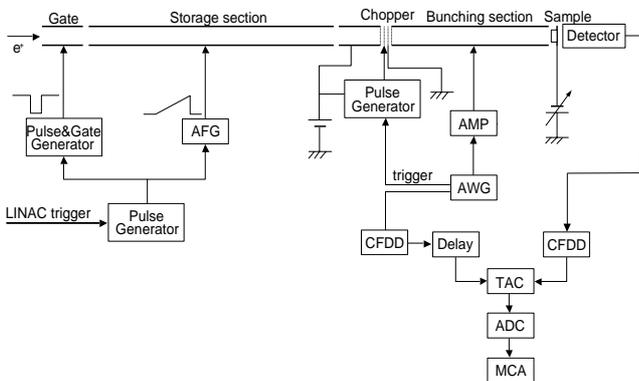


図 1：陽電子寿命測定システム

単色化を行い^[1]、 $\sim 5 \pm 2 \text{ eV}$ のエネルギーで輸送している。このビームを用いてバンチを行うため、電極類の設計や時間幅の評価を行い、実際に装置を組み上げ実験を行った^[2-6]。装置は陽電子蓄積部およびバンチング部から構成されている。陽電子蓄積部で陽電子を貯め込み準連続ビームを形成し、その後任意波形発生器から得られる波形を増幅して電極に与え、陽電子を時間的に収束させている。これらの現状や問題点などについて以下に述べる。

2. 陽電子蓄積・準連続ビーム化

陽電子発生部から得られる低速陽電子ビームは、上述のように $\sim 2 \mu\text{s}$ のパルス幅で繰り返し 30 pps であり、磁場中再放出装置を導入して低速・単色化を行い、 $\sim 5 \pm 2 \text{ eV}$ のエネルギーで輸送している。これをそのまま短パルス化することは、エネルギー拡がりや計数率の面からも現実的でなく、目的の時間分解能を得ることはできない。そこで、図 1 のシステム図に示すように、陽電子蓄積部で陽電子を貯め込み準連続ビーム化を行った。これによるメリットは、原理的には陽電子のエネルギー拡がりを更に抑えることができ、後で行う短パルス化においてパルスの時間幅を小さくするのに有効となることである。もう一つのメリットは計数率を大幅に向上できる点である。実際、この方式で実験を行ったところ、元々 $\sim 2 \mu\text{s}$ の幅の陽電子を 15-30 ms 程度まで引き伸ばすことができた。元々のビームが 30 pps であることから、この程度準連続ビーム化できれば十分である。

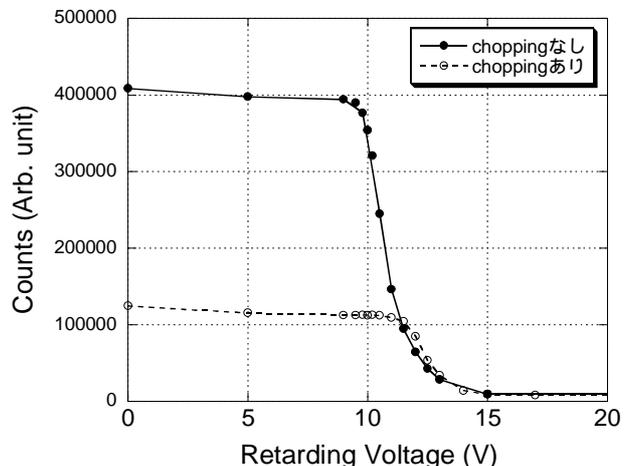


図 2：準連続化したビームのエネルギー広がりの積分分布

¹⁾ E-mail: tashiro@bms.sanken.osaka-u.ac.jp

これまでの短パルス化において時間分解能が予想よりも大きい原因として、準連続化したビームのエネルギー広がりが考えられてきた。結局この解決には至っていないが、さらにバンチングの直前で行われるチョッピングによる劣化を確認するため、バンチ電極に追い返し電圧をかけることによってビームのエネルギー広がりを測定した。ちなみに蓄積部出口の電極は 10 V であるので、準連続化したビームのエネルギーは 10 eV 程度となる。図 2 に計測結果を示すが、チョッピング波形の電圧は 12 V を基準にしているため、それ以下の陽電子がかなり取り除かれていることがわかる。また、12 V 周辺で白丸が黒丸を上回っている部分が見られるが、これがチョッピングによって陽電子のエネルギーが乱されている結果と考えられる。

3 . 陽電子の短パルス化

準連続化されたビームはその直後チョッピング、バンチングされることにより、試料部でバンチが形成される。バンチングは接地されたメッシュと 1 mm 離れたバンチ電極前面に張られたメッシュとの間に時間的に変動する電場を与え、試料部で時間空間的に収束されるように行われる。この時、バンチ電極に与えられるべき理想的な電圧 $V(t)$ は以下の式で与えられる。

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

ここで、 m と e はそれぞれ陽電子の質量と電荷、 L は試料部までの距離、 E_0 は陽電子の初期エネルギーであり、 $t(0)$ は試料に収束される時間を 0 としている。以前は上式で表される理想曲線とそれをつなぐサイン波を任意波形発生器(AWG)で発生させていたが、周波数を高くして帯域のミスマッチが起こるので、伝送回路中で波形が歪むことを利用し、AWG ではサイン波形を発生させ、その後増幅器を通してバンチ電極に与えられた波形を受動プローブでモニターし、理想曲線と一致する部分をバンチングに利用するようにバンチ電極のオフセット電圧、チョッピング波形のタイミングを調整した。モニターしたバンチ電

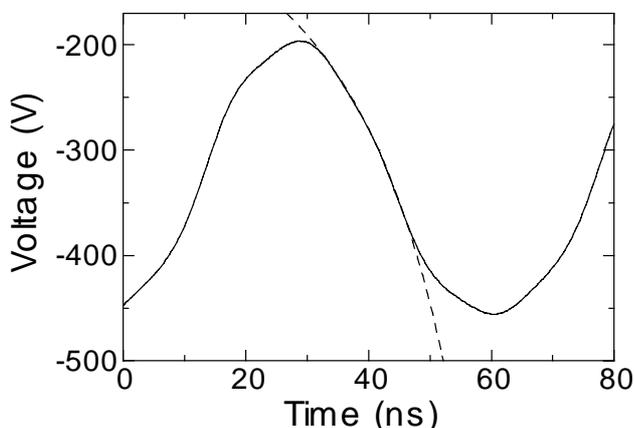


図 3 : バンチ電極での波形 (実線) と理想関数 (破線)

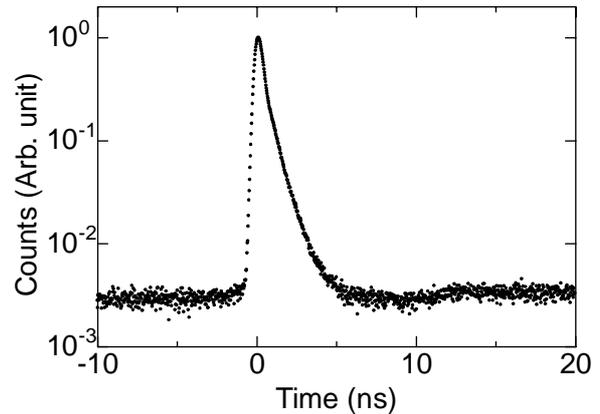


図 4 : シリコンウェハの陽電子寿命スペクトル。このときの陽電子の入射エネルギーは ~1 keV。時間分解能は 300 ps 程度である。

極での波形を図 3 に示す。

実際の短パルス化においては、寿命スペクトルを確認しながらチョッパー波形のタイミングや幅などを調整するが、今回バンチ電極のオフセット電圧も調整し、実験的に最適な条件を求めた。その結果、100 V 程度小さいオフセット電圧 (~250 V) で時間分解能が良くなることがわかった。以上の条件により得られた陽電子寿命スペクトルを図 4 に示す。このとき、試料としてシリコンウェハを用い、陽電子の平均入射エネルギーはおよそ 1 keV であった。時間分解能は陽電子の入射エネルギーやチョッパー波形の微調整により変化するが、時間分解能としておよそ 300 ps 程度を得ることができた。これは、放射性同位元素を用いた従来の陽電子寿命測定装置と比べて若干大きい。高分子材料中でのナノ空隙評価のために測定されるオルソポジトロニウム (*o*-Ps) のピックオフ消滅の寿命 (通常 1 ns 以上) に比べて十分小さい。S/N については 340 程度となり、以前よりも向上したが、目標の 3 桁以上に比べると依然として小さくなっている。この原因としては、チョッパー付近に 4 枚のタングステンメッシュが使用されているため、ここでの消滅線が検出されるためと考えられる。今後より透過率の高いメッシュに変更することにより S/N の更なる向上が期待できるが、そのためには粗いメッシュを使用することによる電場の漏れなどを再考慮する必要があると考えられる。いずれにしても、現時点での時間分解能と S/N から、この装置を用いて高分子薄膜のナノ空隙評価が可能となった。

そこで、実際に高分子薄膜を作製し、本装置を用いて測定を行った。ここでは、ポリスチレン(PS)の二層膜(PS(~350 nm)/PS(~350 nm)/Si) について陽電子寿命測定を行った結果を示す。図 5 は、陽電子の平均入射エネルギーが 0.3、2、10 keV の時の、それぞれの陽電子寿命スペクトルである。スペクトルの長寿命の減衰成分が *o*-Ps のピックオフ消滅を表している。陽電子の入射エネルギーは試料への侵入深さに換算できる。侵入深さを変えることにより *o*-Ps の寿命や生成率が変化しているのがわかる。0.3 keV では表面の影響により 2 keV よりも長い寿命を示している。

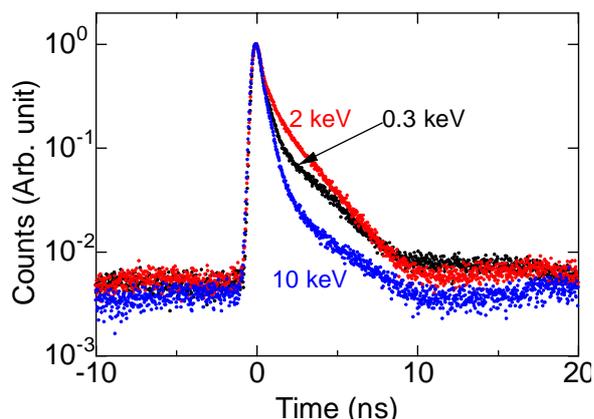


図5：陽電子の入射エネルギーが0.3, 2, 10 keVにおけるポリスチレン二層膜の陽電子寿命スペクトル

また、10 keVでは多くの陽電子が基板であるシリコンに入射するため、*o*-Psの生成率が減少していることがわかる。このように、本装置は薄膜材料の深さ方向のナノ空隙評価が可能である。

4.まとめ

阪大産研 S バンド電子ライナックから得られる高強度の低速陽電子ビームを短パルス化し、陽電子寿命測定システムを開発した。現時点では、時間分解能がおおよそ 300 ps、S/N が 340 程度である。これにより、高分子薄膜材料中のナノ空隙を試料の深さ方向に対して評価することが可能となった。今後、レジスト材料などの高分子薄膜材料の測定を行うとともに、更に時間分解能や S/N 向上を行っていく予定である。

参考文献

- [1] Y. Honda, et al., Material Science Forum, 255-257 (1997) 677-679.
- [2] M. Tashiro, et al., Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, July 12-14, 2000, pp. 407-409.
- [3] M. Tashiro, et al., Radiation Physics and Chemistry, 60 (2001) 529-533.
- [4] M. Tashiro, et al., Materials Science Forum, 363-365 (2001) 664-666.
- [5] M. Tashiro, et al., Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2001, pp. 309-310.
- [6] M. Tashiro, Y. Honda, Y. Terashima, M. Watanabe, P.K. Pujari, S. Tagawa, Applied Surface Science, in press.