

[F18p02]

## Production of an intense slow positron beam with an electron linac and its applications to material analysis

T. Ohdaira, R. Suzuki, and T. Mikado

Electrotechnical Laboratory

1-1-4, Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568

An intense slow positron beam is produced from high-energy (70 MeV) electrons from a linac at the Electrotechnical Laboratory. The slow positron beam is used for a variable-energy positron lifetime spectroscopy and a time-of-flight positron-annihilation induced Auger electron spectroscopy.

### 電子リニアックを用いた高強度低速陽電子ビームの発生と材料分析への応用

#### 1. はじめに

電総研では、電子リニアックを利用して陽電子を発生し、毎秒  $10^8$  個の低速陽電子ビームの利用が可能である。我々はこれを短パルス化し、入射エネルギー可変陽電子寿命測定や飛行時間分析型陽電子消滅励起オージェ電子分光などの材料分析に利用している。本研究会では、低速陽電子ビームの発生とこれを利用した材料分析の例を紹介する。

#### 2. 低速陽電子ビームライン

陽電子の発生には、電子リニアックから得られるエネルギー70 MeV のパルス状の電子ビーム(平均電流  $6 \mu\text{A}$ )を用いている<sup>1)</sup>。これを水冷したタンタルコンバーターに入射し、ここで制動放射X線、 $\gamma$ 線からの電子・陽電子対生成により高エネルギー(keV~MeV)の陽電子を発生する(図1参照)。これをタングステン薄膜のモデレーターに入射し、薄膜内で熱化して表面から再放出してきたものを電場で引き出すことにより、単色(5 eV)の低速陽電子ビームを形成している。陽電子ビームはヘルムホルツコイルを用いた磁場輸送により約 20 m 離れた実験室まで導かれる。電子リニアックはパルス幅  $0.5 \mu\text{s}$ 、繰り返し 100 パルス/秒で運転されているので、陽電子もこれに同期して発生する。しかし、このパルスは幅、間隔ともに広すぎて陽電子寿命測定や飛行時

間測定には適さない。このため、ビームラインには途中にペニングトラップ方式の陽電子蓄積部が設けてあり、蓄積した陽電子を電子リニアックの次のパルスまでの間に少しずつ引き出すことにより直流的なビームを形成している<sup>2)</sup>。ただし、モデレーターで減速されなかった高エネルギーの陽電子や二次電子は蓄積されず、そのまま素通りしてしまう。オージェ電子測定では、これらの高エネルギー粒子によって発生する大量の二次電子が検出器の効率低下やバックグラウンド上昇の原因となる。そのため、ビームライン途中でパルス偏向磁場を用い

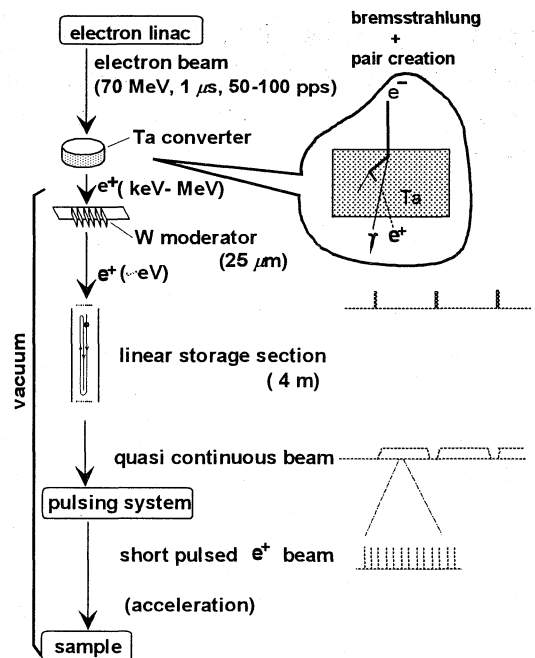


図1 低速陽電子の発生と蓄積法による連続ビームの形成

てこれらを除きしている。

### 3. 入射エネルギー可変陽電子寿命測定

陽電子を物質中に入射すると、数 100ps の寿命で周囲の電子と消滅して $\gamma$ 線を放出する。物質中にわずかでも空孔型欠陥が存在すると、ほとんどの陽電子はその空孔にトラップされる。空孔サイズが大きいほど電子密度は低くなるので、陽電子の寿命は長くなる。このような性質を利用して、陽電子寿命測定から物質中の空孔型欠陥の有無とその大きさを評価することができる。

従来の  $^{22}\text{Na}$  等の放射性同位元素を用いる方法では、陽電子線は白色であり平均エネルギーも 220keV と高いのでバルクの情報しか得ることができない。これに対して、当所で開発した短パルス低速陽電子ビームを用いる装置<sup>3)</sup>では、陽電子ビームの入射エネルギーを 0.3~30keV の範囲で変えることができ、陽電子の打ち込み深さを表面~数 $\mu\text{m}$  の範囲で任意に制御することができる。これにより、近年重要になっている半導体等の薄膜層やイオン注入層等の表面近傍の浅い領域に存在する格子欠陥の大きさとその深さ分布を調べることができる。

図2は入射エネルギー可変陽電子寿命測定装置の概略図である。この装置では、連続ビームからパルス幅 150 ps のパルスビームを形成して試料に入射する。陽電子が試料中で消滅するまでの時間(寿命)は、パルスビームが入射してから消滅 $\gamma$ 線が検出されるまでの時間差から得られる。図3は、フッ素イオン注入( $12\text{keV}$ ,  $4 \times 10^{15} \text{ F/cm}^2$ )を行ったシリコン単結晶の、イオン注入領域の陽電子寿命測定を行った結果である<sup>4)</sup>。注入直後の試料の寿命は約 300ps であり、Si 二原子分の複空孔が形成されていることがわかる。また 1100 $^{\circ}\text{C}$ の昇温を行うと、陽電子寿命は約 600ps と長くなる。これは、昇温により複空孔が集まって、さらに大きな空孔クラスターが形成されたことを示している。

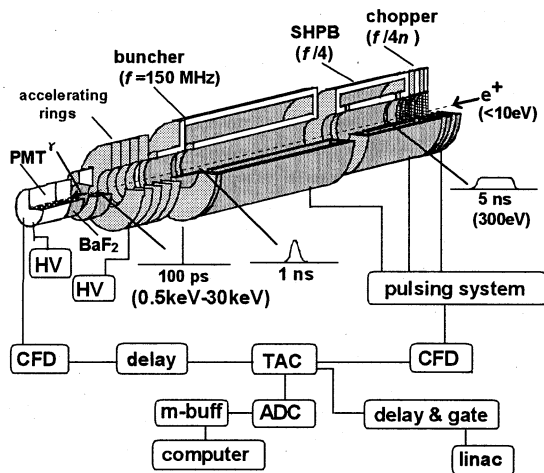


図2 入射エネルギー可変陽電子寿命測定装置

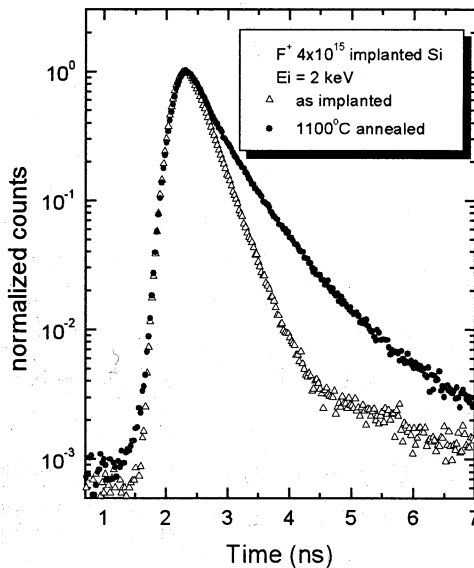


図3 フッ素イオン注入 Si の陽電子寿命スペクトル

### 4. 飛行時間分析型陽電子消滅励起オージェ電子分光

陽電子消滅励起オージェ電子分光 (PAES) では、数 10 eV 程度の低エネルギーの陽電子ビームを試料に入射し、表面の鏡像ポテンシャルに捕まった陽電子が最表面原子の内殻電子と消滅することによりオージェ電子放出が起こる。PAES は 1) 最表面のみに限ったオージェ分析が可能、2) 二次電子によるバックグラウンドが無い、3) ビーム照射

損傷が少ないという優れた特徴がある。しかし、これまで開発された装置では  $^{22}\text{Na}$  を陽電子源として用いているためにビーム強度が弱く、そのため検出可能な元素は内殻消滅確率の高い一部の元素に限られ、さらに測定には数時間以上必要という欠点があり、実用性という点で問題があった。

当所では、高強度の低速陽電子ビームを用いることにより、従来の PAES 装置よりも高い計数率とエネルギー分解能で、ほぼ全ての元素の分析を行うことのできる PAES 装置を開発した(図4)<sup>5)</sup>。この装置では、パルスビームを用いた飛行時間 (time of flight : TOF) 法を用いている。TOF 法では全エネルギー領域の電子を同時に測定することができるので、円筒鏡型分析器のようなエネルギーを細かく走査して行く方法よりもはるかに効率の良い測定が可能である。

図5は、Si(111)表面上の酸素の初期吸着過程を調べるため、分析チャンバーに酸素 ( $\text{O}_2$ ) ガスを導入しながら、その場観察により Si LVV 及び O KLL オーজেピーク強度の時間変化を調べた結果である。酸素分圧  $8.5 \times 10^{-10}$  Torr の条件下では O-KLL 強度の増加及び Si-LVV 強度の減少は約 10 分、すなわち約 0.5 L (1L =  $10^6$  Torr 秒) の曝露で飽和状態に達する。この結果から、曝露量 0.5 L 以上では、最表面上の吸着酸素量はほとんど一定であることがわかる。図5の結果で注目すべき点は、PAES が最表面上の酸素に対して非常に感度が高いことである。0.5 L の酸素曝露による Si(111)上の酸素被覆率は約 0.05 モノレイヤーであり、従来の電子励起による AES では、この程度の微量の吸着では基板からの信号強度はほとんど減少しない。これに対して PAES では、Si LVV ピーク強度は約 7 割減少し、また O KLL ピーク強度も単純に被覆率から予想される強度よりも一桁以上強い。この結果が示すように、PAES は最表面に吸着した微量の原子・分子に対する検出感度が極めて高いことがわかる。これは、陽電子が最表面上の吸着原子・分子にトラップされる効果があるためと考えられる。

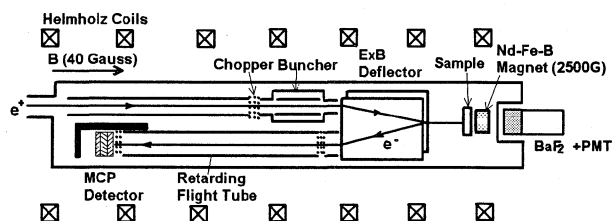


図4 TOF-PAES 装置

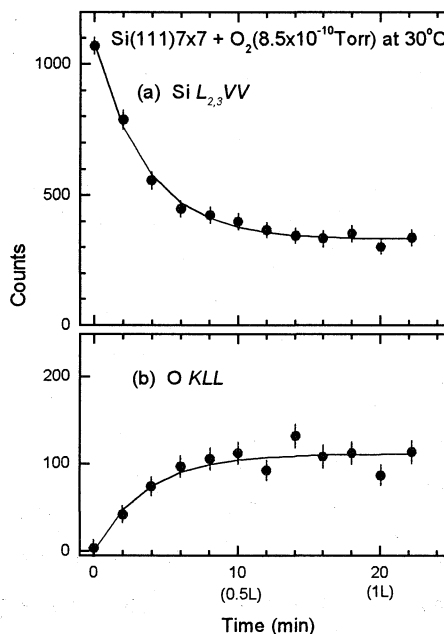


図5 酸素ガス曝露中の Si(111)表面からの Si LVV 及び O KLL オーজেピーク強度の時間変化

- 1) 三角智久他、放射線 15 (1988) 78.
- 2) T. Akahane *et al.*, Appl. Phys., A51 (1990) 146.
- 3) R. Suzuki *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 30 (1991) L532.
- 4) A. Uedono *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 36 (1997) 2571.
- 5) T. Ohdaira *et al.*, J. of Electron Spectroscopy 88-91 (1998) 677.