

[09-A08]

## EVALUATION OF DIAGNOSTICS OF FEMTOSECOND ELECTRON PULSE

T.Watanabe, J.Sugahara, K.Yoshii, T.Ueda, M.Uesaka  
Nuclear Engineering Research Laboratory, University of Tokyo  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1106, Japan  
Y.Shibata, Research Institute for Scientific Measurements, Tohoku University  
Y.Kondo, Faculty of Engineering, Tohoku University  
K.Nakajima, High Energy Accelerator Research Organization  
S.Kondo, M.Kando, H.Kotaki, Japan Atomic Energy Research Institute

**ABSTRACT** Diagnostics of subpico- and picosecond electron pulses have been performed by the three methods at 35 MeV S-band linear accelerators at Nuclear Engineering Research Laboratory, University of Tokyo. The methods we adopt were the femtosecond streak camera with a reflection optical system, the coherent transition radiation (CTR) Michelson interferometer and the CTR polychromator. The results were compared with one another, and the reliability of the methods to diagnose the femtosecond electron pulse has been discussed and evaluated.

### フェムト秒電子パルス計測法の総合評価

#### 1. はじめに

東大院工原施ライナックでは従来より極短電子シングルパルスの発生に関する研究を行ってきた。現在、レーザーフォトカソードRFガン・加速管・シケイン型磁気パルス圧縮器からなる18MeVライナックを用いて440fs(半値幅、以下同様)パルスの生成に成功している。フェムト秒からサブピコ秒の領域まで達した極短電子シングルパルスは、ピコ秒からフェムト秒の時間分解を有する時間分解X線回折、放射線パルスラジオリシスなどの高時間分解ポンプ&プローブ解析やレーザー加速など様々な応用実験に利用されている。

極短パルスの発生の計測、調整にはストリークカメラを用いてきた[1]。現在使用しているフェムト秒ストリークカメラは時間分解能200fsを有する。一方、更なる極短パルスの発生として、更に安定したレーザーと同ライナックを用いた100fsパルス、及びプラズマカソードを用いた~10fsパルスの生成を計画が進行している。これらのフェムト秒パルスは、従来のパルス計測に用いてきたフェムト秒ストリークカメラの計測限界よりも短い為、代替的な計測手段の開発・確立が必須課題となっている[2]。そこで、本研究では代替案として有力なコヒーレント放射を用いた計測手段としてマイケルソン干渉計[3,4]及びポリクロメータに注目した[5]。サブピコ秒からピコ秒のパルスをこれらの手法及び従来の手法(フェムト秒スト

リークカメラ)で同時に計測・比較することで、フェムト秒電子パルスの計測法としてのコヒーレント放射を用いた手法の信頼性について議論し、フェムト秒計測器としての総合評価を行った。

#### 2. コヒーレント放射による計測法

電子パルスが金属膜などのような誘電率の違う境界線上を通過した際、遷移放射が見られる。この放射は電子のパルスと同じ空間分布を有し、連続的なスペクトル分布を持つ特徴がある。このスペクトルのうち、電子パルスの長さと同等あるいはそれよりも長い波長を持つ放射は、各電子から放射される際の位相が揃っているためコヒーレントとなる。このコヒーレント遷移放射を用いた2種類の計測法を以下に示す。

##### 2-1. マイケルソン干渉計

コヒーレント遷移放射をマイケルソン干渉計に導き、その干渉パターンをフーリエ変換することで、その放射のパワースペクトルを求めることができる。このスペクトルは電子パルスを構成する各々の電子が発した光の重ね合わせとなっていて、電子パルスの構造を反映している。一方、一電子が発する光のスペクトルは理論的にもとまる。これらと比較することで、電子パルスを構成する電子の構造(空間的形状)を知ることができる。これがマイケルソン干渉法によるパルス計測である。

## 2-2. ポリクロメータ

マイケルソン干渉計において、パワースペクトルを求めるために干渉パターンを取得した。この際、干渉パターンを一つ取得するには一定時間のパルスを用いるため、複数のパルスの平均値のみ求まるという干渉法の特徴がある。一方、ポリクロメータはパルス毎にスペクトルを取得できる特長を持つ。各パルス毎に得られたスペクトルは、干渉法と同様の解析手法を用いてパルス毎にパルス波形が導かれる。本実験では液体ヘリウム冷却型 10ch InSb ポリクロメータを用いた。

## 3. 実験

### 3-1. 反射型光学系ストリークカメラ

従来より用いられてきたレンズ系のストリークカメラを用いて計測限界に近い計測を行っている際、時間分解能と光量の間に関係がある。つまり、広いスペクトルを持つ空気チレンコフ光をレンズ系で入射スリットまで導き、レンズ系で結像を行う場合、レンズの色収差によるパルス伸長が見られる。それを解消するためにバンドパスフィルタを挿入すると、光量が落ちてしまう。そこで、ストリークカメラ内部にある結像系を反射光学系に置換した(図1参照)。これにより、極短パルスを光量多く測定することができるようになった。本実験では、この反射型光学系ストリークカメラを用いた。

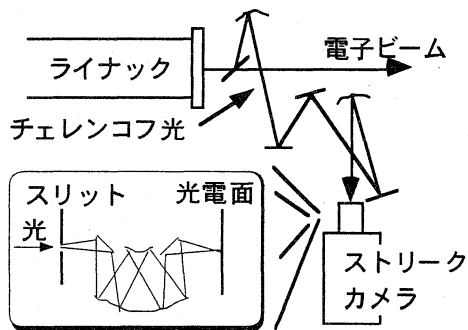


図1 反射型光学系ストリークカメラ

遷移放射による測定実験体系を図2に示す。ライナックによって生成された極短パルスがアルミ箔を通過した際に発生する遷移放射は、アルミ箔の角度を変えることでマイケルソン干渉計又はポリクロメータに導かれる。また、アルミ箔の前にミラーを挿入することで、電子が空气中で発するチレンコフ光を反射型光学系ストリークカメラに導く。それぞれの測定器には、ビームを照射したまま順次導くことで、同時測定に近い状況で行った。ビームパラメータとして、600fs~10ps まで複数のパルス幅を用い、それぞれについて比較・検討を行った。

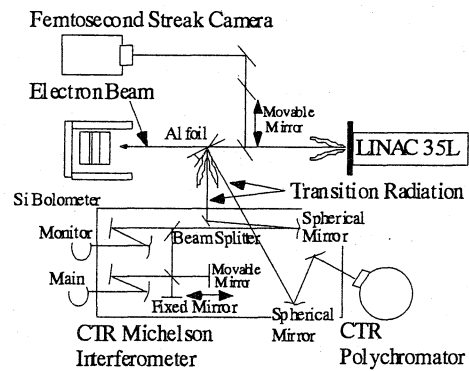


図2 実験体系

## 2. 結果と考察

3手法を同時に測定した際の、干渉法より導出されたスペクトル、ポリクロメータによって取得されたスペクトル、及びビームスプリッター(厚さ 100 $\mu$ m マイラー)効率  $|RT|^2$  を図3に示す。ビームスプリッターの効率より、干渉パターンから得られるスペクトルのうち解析に有効な値は 10.0 ~ 20.0  $\text{cm}^{-1}$  であると言える。一方、ポリクロメータにおける有効範囲は回折格子のピッチ (1mm) より予め 12.2~26.2  $\text{cm}^{-1}$  と決められている。

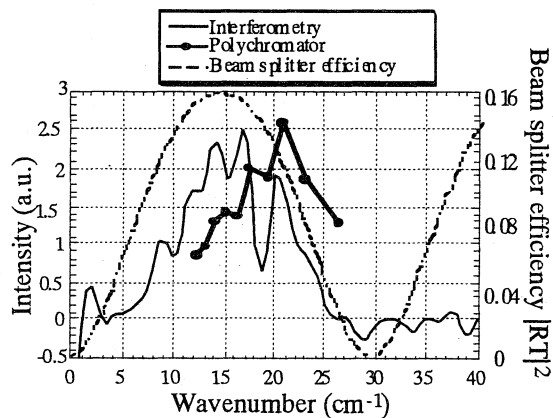


図3 遷移放射スペクトル

スペクトルから得られる縦方向バンチ形状因子を図4に示す。上述の通り、実験から得られるスペクトルには有効な範囲が限られているので、理論式によって外挿する必要がある。また、ポリクロメータによって得られた離散的なスペクトルは、各離散点間を内挿する必要もある。実線は実験値であり、点線はガウシアン分布だとみなした場合のバンチ形状因子の理論式である。外挿に用いられる理論曲線として指数関数、三角波なども挙げられるが、ストリークカメラによるシングルショットの画像を見る限り、ガウシアン分布が実際のビームに最も近いと判断し、ガウシアンを採用した。

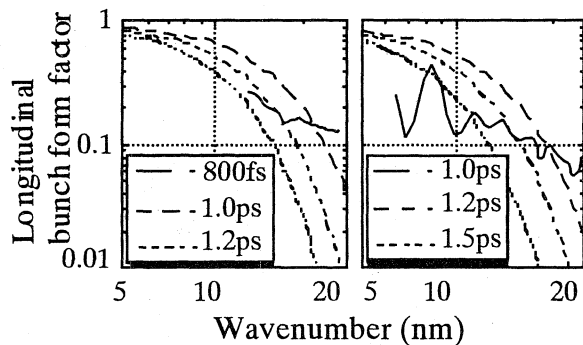


図4 縦方向バンチ形状因子 実線は実験値、点線は理論値、左図がポリクロメータ、右図が干渉法による結果。

最終的に、外挿・内挿された縦方向バンチ形状因子より縦方向の電子パルス分布が図5のように求まる。同時に測定を行っていたストリークカメラの測定結果は1.0psであり、干渉計とポリクロメータによる結果はそれぞれ1.2ps、1.0psであった。これより200fsの範囲内で結果が良好な一致を示していることがわかる。

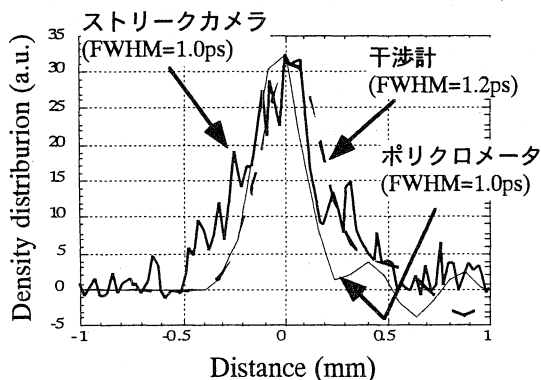


図5 再構成された縦方向パルス波形

干渉法とストリークカメラによる、サブピコ秒(650fs)パルスの測定結果を図6に示す。図6においても、干渉法とストリークカメラとの間に良好な一致が見られた。

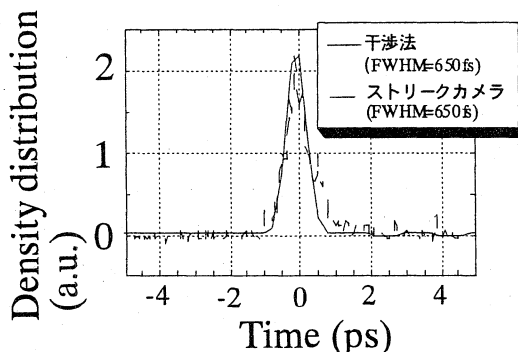


図6 サブピコ秒パルス計測結果

一方、同時に行っていた数ピコ秒パルスにおいては3者に良好な一致は見られなかった。これは、計測された波長範囲がサブピコ秒パルスに適合し、ピコ秒パルスには不適合であったためであると考えられる。ストリークカメラによって計測されたパルスから得られる縦方向バンチ形状因子を図7に示す。この図からわかる通り、パルスが短くなるほどバンチ形状因子は高波数まで値を持ち、本実験で有効であった10~20cm<sup>-1</sup>の範囲で有意な値を示しているのは1.0psパルスである。一方、この範囲における長パルスの形状因子はノイズと区別できないくらい小さい値であることがわかる。したがって、ビームスプリッタ又は回折格子のピッチを的確に選択することにより、更に短いパルスを正確に計測が可能であることがわかる。しかし、計測対象のパルス幅によって装置の一部を置換する必要があるという問題点が残った。

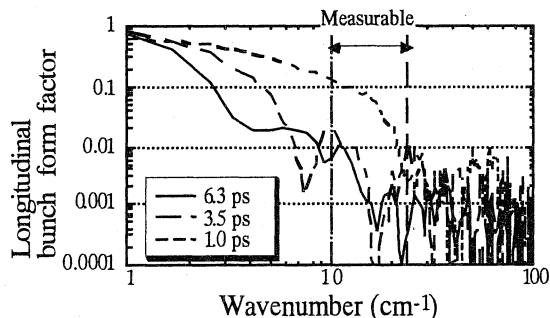


図7 ストリークカメラで取得したパルス波形より計算されたバンチ形状因子

### 3- 結論 (総合評価)

3手法によるサブピコ秒、ピコ秒電子パルスの計測を通して、サブピコ秒及びフェムト秒パルス計測器として期待されるコヒーレント放射を用いた手法の信頼性について確認した。その結果、正確な計測には的確な波長範囲の選択が不可欠であることを示した。また、コヒーレント放射を用いた計測法には計測対象によって装置の一部を置換する必要があるという問題点が残ったため、ストリークカメラの計測範囲(>200fs)はストリークカメラ、それ以下はコヒーレント放射による計測、更にパルス毎の計測に注目すればポリクロメータが最適であることがわかった。

### 参考文献

- [1] M.Uesaka et al., Nucl. Instr. Meth. A 406, 371 (1998).
- [2] T.Watanabe et al., Nucl. Instr. Meth. in press.
- [3] Y.Shibata et al., Phys. Rev. A 44, 3445 (1991).
- [4] R.Lai et al., Phys. Rev. E 50, 4292 (1994).
- [5] J.Sugahara et al., Proc. of PAC99, in press.