

マルチバンチワイヤースキャナー用検出器の開発

井上洋一^{1A)}、樋口正人^{A)}、本郷 忍^{A)}、早野仁司^{B)}、内藤 孝^{B)}

^{A)}東北学院大学大学院工学研究科応用物理学専攻

〒985-8537 多賀城市中央一丁目13番1号

^{B)}高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

概要

リニアコライダーのための試験加速器(ATF)では、低エミッタンスマルチバンチビーム開発を行っており、エミッタンスモニターのひとつとして取り出したビームに対してタングステンワイヤースキャナーを使用したワイヤースキャナーを使用している。マルチバンチビームのエミッタンスを測定するためにはワイヤースキャナーから発生するそれぞれの γ 線を識別して検出する必要がある。本研究ではチェレンコフ光が高速である事に着目して高速の光検出器を開発しワイヤースキャナーに応用する事を試みた。 γ 線は鉛コンバーターにより電子陽電子に変換され、空气中を走ったときにチェレンコフ光を利用する。高速のフォトダイオードにより検出された信号は高速のオシロスコープにより捕らえられ、マルチバンチのビームサイズ測定が可能となる。このモニターは現在ATFにおいて常時使用されており重要なエミッタンス測定ツールとなっている。

1. 序論

将来加速器リニアコライダーでは低エミッタンスマルチバンチビームが必要とされており、そのおおよそのパラメータは 1×10^{10} 個の電子あるいは陽電子をもつ100個のバンチ(バンチ間隔2.8ns)を加速する必要がある、横方向のエミッタンスは、 $\epsilon_{xn} = 3 \times 10^{-6} \text{rad} \cdot \text{m}$ 、 $\epsilon_{yn} = 3 \times 10^{-8} \text{rad} \cdot \text{m}$ である。このようなビームの実現実証を目的とした加速器開発を行っている試験加速器(ATF)では、バンチ数は20バンチと制限された設計であり、X方向エミッタンスも $\epsilon_{xn} = 5 \times 10^{-6} \text{rad} \cdot \text{m}$ とやや大きめの設計ではあるがその実現実証はリニアコライダー実現に大きな意味をもつ。ATFにおいては昨年までにシングルバンチでのエミッタンス開発に重点をおいていたが、2001年からはマルチバンチエミッタンス開発に重点を移しつつある。このような中、マルチバンチの各バンチのエミッタンスを直接測定するモニターが必要とされているが、大強度の制動放射 γ 線の測定を使用しているタングステンワイヤースキャナーがもっとも簡単に高速化が可能であり、かつ高速化による精度の劣化もない。 γ 線は鉛コンバーターにより電子陽電子に変換され、空气中を走ったときにチェレンコフ光を利用して検出されるので、高速

の光検出器を開発し応用すればよい。このとき、高速とは2.8ns毎に30ps程度の広がりをもってくる γ 線をたがいに混ぜ合わさず独立して強度検出をする事である。このような光検出器として、我々はアバランシェフォトダイオード(APD)を選んだ。本研究はこのAPDの高速チェレンコフ光検出器への応用である。

2. ワイヤースキャナー

ワイヤースキャナーは内部に金メッキされたタングステン製ワイヤースキャナー(径 $10\mu\text{m} \cdot 50\mu\text{m}$)が複数本張られており、 $0.5\mu\text{m}$ の移動精度で走査される。図1に示すように同様のものがダンピングリングからのビーム取り出しラインに5台設置されている。本スキャナーはビームの水平(X)軸と垂直(Y)軸方向を一度にスキャンすることが可能である。

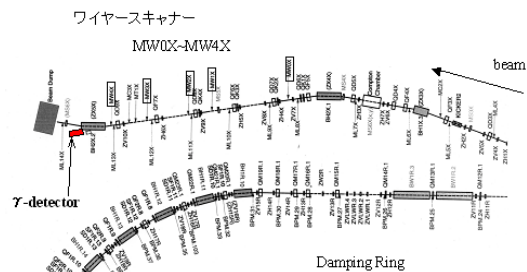


図1: ワイヤースキャナーの設置位置

3. 検出器

γ 検出器は5台のワイヤースキャナーよりさらにビーム下流に1つ設置され、共通の検出器として用いられる。実験初頭にはMCP付光電子増倍管による評価も行ったが、マルチバンチビームによる実験では温度コントロール・アンプ内蔵型APDモジュール(浜松ホトニクス社製:C5658)を用いた。表1に基本パラメータを示す。

APDのベンチテストでは、光量に対する出力パルスの直線性、2.8ns以下のリカバリータイムを確かめた。

発振中心波長650nm、パルス幅60ps、最大ビームパワー70mWのライトパルサーを用いた時の応答波形を図2に示す。応答は2.8ns以内に収まっているが、回路的なリングングが確認できる。

¹ E-mail: d0196101@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

	APD モジュール
有効受光面サイズ(mm)	φ0.5
感度波長範囲(nm)	400~1000
最大感度波長(nm)	800
受光感度(A/W) M=1; λ=800(nm)	0.5
Q.E.(%); M=1; λ=800(nm)	75
遮断周波数 (GHz)	1
増倍率; λ=800nm	100

表 1 : APDモジュールのパラメーター

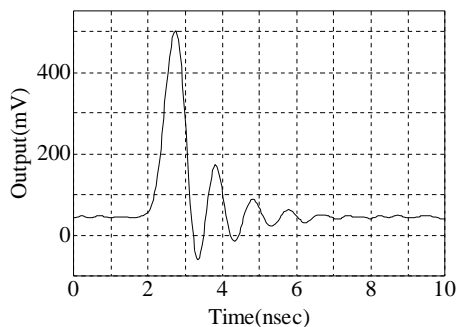


図 2 : テストパルス応答波形

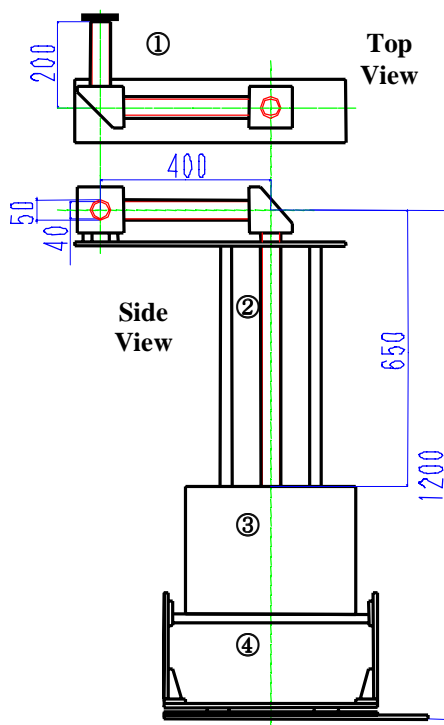


図 3 : 高速 γ 線検出器

ワイヤースキャナーにより発生した γ 線は角度分布が小さく、ビームライン上に大部分が発生する。そのため γ 線を確実に鉛コンバータに入射させる必要があり、検出器およびライトガイドの位置調節機構を設置した。

稼動範囲は上下、左右ともに $\pm 20\text{mm}$ である。セットアップを図 3 に示す。図中の番号は、

- ① Air チェレンコフ光発生部 (鉛コンバーター)
- ② ライトガイド部(Air)
- ③ チェレンコフ光検出部 (レンズ、APD)
- ④ 位置調節部

である。

4. マルチバンチ低エミッタンスの測定

実際のビーム試験に使用したアバランシェフォトダイオードは浜松ホトニクス社製の温度安定化回路と高速アンプを組み込んである C5658 である。これは実験には長期間の安定度が必要とされるため、実験室でいろいろ試した実験回路を組み込むのではなくまず実績のある APD モジュールを最初に使用する事にしたためである。オシロスコープの波形から γ 線の強度を得る方法としては以下の様にした。

まず $50\mu\text{m}$ のワイヤーを使用しビームにあてマルチバンチ全バンチがワイヤーに当たるようにワイヤー位置を設定する。この状態で γ 線信号をオシロスコープに捕らえ、それらのピーク位置を記録する。そのピーク位置はそのバンチの信号サンプル点となる。なぜなら、 γ 信号が弱くなっていたりあるいはなかったりしても信号をサンプルしなければならぬからである。もちろん、実際にはその記憶した位置近傍で最大値サーチをしてサンプル点が最大値を逃す事のないようにしている。

また、ビーム強度依存性を無くするためビーム電流検出器からの信号で γ 線強度を規格化してビームサイズを測定する。(この時各バンチ間での各強度がパルス毎にばらつかないと仮定している。)このようにして測定されたマルチバンチ γ 線の信号のオシロ上の波形の例を図 4 に、これらのピークを検出してワイヤースキャンした結果得られた各バンチのプロファイルを図 5 に示す。各バンチ γ 線信号のテールリングングが数%次のバンチへ混ざり込んでいるが、おおむね信号の分離はよい。また、得られたプロファイルはガウスフィットに十分によくのりマルチバンチエミッタンス測定の第一段階としては十分な性能を発揮している。ちなみに、現状得られているエミッタンス値は全バンチ総計でのビーム強度 5×10^{10} 個で約 $\epsilon_{xn} = 3.5 \times 10^{-6} \text{rad} \cdot \text{m}$ 、 $\epsilon_{yn} = 7.5 \times 10^{-8} \text{rad} \cdot \text{m}$ でありシングルバンチ時の性能の約 2 倍の y エミッタンスである。

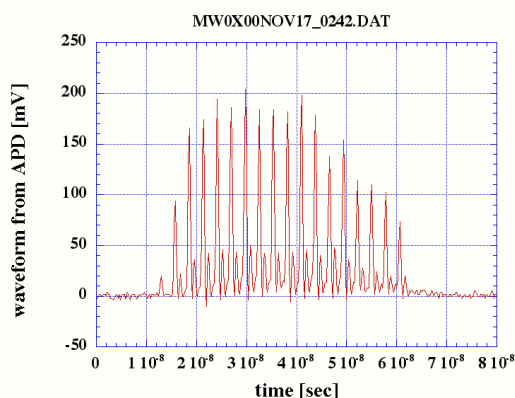


図4：マルチバンチへの応答

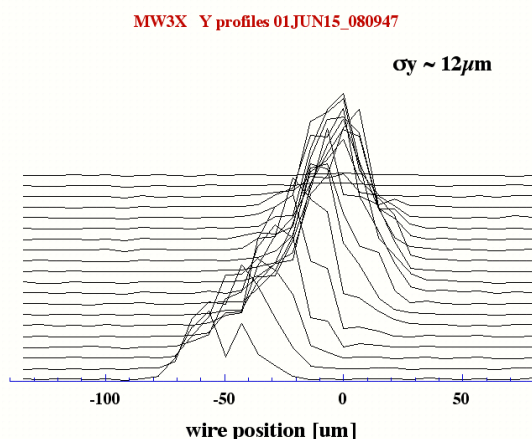


図5：各バンチのプロファイル

5. まとめ

アバランシェフォトダイオードを用いた高速γ線検出器を導入することにより、マルチバンチビームにおけるビームプロファイル及びエミッタンスの測定が可能となった。APDモジュールはいくつかの問題点を持っているがマルチバンチをモニターするための検出器として十分有益なものである。

この測定によって、この時のATFのマルチバンチビームがY方向、全バンチ総計でのビーム強度 5×10^{10} 個で約 $\epsilon_{xn} = 3.5 \times 10^{-6} \text{ rad} \cdot \text{m}$ 、 $\epsilon_{yn} = 7.5 \times 10^{-8} \text{ rad} \cdot \text{m}$ のエミッタンスを持っていることが判った。

今後の課題としてはリング補正や光学系の改良があげられる。現在、エミッタンス算出はオフラインで行われているので、ビーム調整用モニターとして用いるためにオンライン化する必要がある、これも今後の課題である。

6. 謝辞

本モニターの開発にあたり、ATFの運転およびビームの維持をしてくださったシフトに参加して下さる皆様、技術サポートして下さる(有)イーキューブ、(株)関東情報サービスの方々に感謝いたします。特に(株)関東情報サービスの小沢さんにはマルチバンチワイヤーのソフトウェアパネルを作っていただきましたので、あらためてここに感謝致します。さらに、本著者は共同開発研究としてご理解とご支持のありました菅原機構長、木村物質構造科学研究所長、木原教授、高田教授の方々に感謝致します。

参考文献

- [1] H.Hayano, WIRE SCANNERS FOR SMALL EMITTANCE BEAM MEASUREMENT IN ATF.
- [2] 本郷忍：マルチバンチワイヤースキャナー用検出器の開発（東北学院大学修士論文）