

ATF の現状 2002

早野仁司、および ATF グループ
高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設
〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

リニアコライダー加速器入射部の低エミッタンスビーム生成開発を行っている試験加速器(ATF)では、シングルバンチでの目標エミッタンス達成の後、現在マルチバンチでの低エミッタンスの達成を目標に研究開発が進められている。マルチバンチでは垂直方向エミッタンスは各バンチにわたって均一に目標エミッタンスの2倍まで下げる事ができている。附随してレーザーワイヤーモニターの高度化、X線SRモニターの開発、ODRモニターの開発などの先端的モニターの研究、RFガンによるマルチバンチ生成研究も行われている。本報告ではマルチバンチのエミッタンス開発について、そして各種エミッタンスモニターの開発状況の報告を行う。

1. はじめに

ATFは、マルチバンチ低エミッタンスビームの実現という目標のもとビーム開発およびビームモニター開発を行っている。2001年2月にはシングルバンチでのエミッタンスがほぼ目標値(小ビーム強度の時 $x_n=2.6 \times 10^{-6}$ rad.m, $y_n=2.7 \times 10^{-8}$ rad.m)に到達した事を取り出したビームで確認した。現在垂直方向エミッタンスの測定値のふるまいがイントラビーム散乱をいれた予想計算と異なっている原因追求が引き続きなされている。一方、マルチバンチでのエミッタンス達成においては2001年夏にリングのイオンポンプを増強しビーム周回時の真空度改善を行い、さらに軌道調整や縦方向フィードバック、ビームロスの観測などを丹念に行ってきたがY方向エミッタンスはシングルバンチエミッタンスと同じバンチ強度で比較すると2倍程度大きい($y_n=5.8 \times 10^{-8}$ rad.m)。本報告ではそのマルチバンチエミッタンス開発の状況、および、あわせて進められているマルチバンチビームモニターや新たなエミッタンスモニターの開発状況を報告する。

2. マルチバンチ低エミッタンス

熱電子銃からのマルチバンチ発生(20バンチ)はグリッドに357MHzのバーストRFを印可する事で進んでいる。電子銃から取り出しラインまでのビーム強度透過率は50%程度であり、シングルバンチ運転と大差ないが、放射線安全規定上電子銃での発生最大電流が規定されているので、各バンチ強度はシングルバンチ時の約1/3が現状最大である。マルチバンチ運転はまずシングルバンチで十分に調整を行

った後にリングと取り出しラインのパラメーターを触らずにマルチバンチを効率よく入射する様にリニアック、トランスポートラインを調整するという方法で行っている。2001年秋から冬にかけてリングアーク部の未装着部分のイオンポンプ増強およびトリスタンリングから移設した40l/sイオンポンプを新品に取り替えてマルチバンチ入射時のリングの平均真空度を 1.2×10^{-6} paから 0.7×10^{-6} paに改善した。この際リングはマルチバンチの3トレイン入射でかつ蓄積モードで運転され最大50mAの大電流での焼きだし運転を行った。この時最小のY方向エミッタンスは全ビーム強度 4.5×10^{10} の時(各バンチ強度は約 2.6×10^9)、 $y_n=5.8 \times 10^{-8}$ rad.mと目標の2倍の大きさで測定されている。なお、X方向エミッタンスはシングルバンチ時と同様である。エミッタンスの測定は取り出しラインのタングステンワイヤーやリング内のレーザーワイヤーにおいては全バンチの平均射影で計測され調整やスタディーが進められているが、同時に各バンチのエミッタンスを計測する検出器や回路も立ち上がっていてマルチバンチエミッタンスも計測可能となっている。

3. 低エミッタンスビームモニター

このダンピングリング低エミッタンスビームのY方向エミッタンスを精度よく測定する事はいろいろな困難がある。まず測定対象自体が $6 \sim 8 \mu\text{m}$ のビームサイズというかなり高分解能な測定装置が必要という点である。またY方向は $6 \sim 8 \mu\text{m}$ であるがX方向が $40 \sim 100 \mu\text{m}$ と扁平なビームであるので数度のビームの傾き(またはビームラインの数%のX-Yカップリングあるいは測定装置の傾き)によりY方向サイズはすぐに大きく測定されてしまう。そしてディスパージョンによるビームサイズ増大の効果を正確に差し引かなければならない、すなわちディスパージョンを正確に測定しなければならないという点でも困難が生じる。さらにビーム強度に強く依存したイントラビーム散乱によるサイズの変化も起きている。したがって低エミッタンスの確認には広いダイナミックレンジをもつ高精度、高分解能なサイズモニターが必要であり、ディスパージョンの正確な測定には高分解能なビーム位置モニターが必要となってくる。さらに測定の間ビームは十分に安定でなければならないので、ビーム安定化開発も必要となる。このように低エミッタンスビーム計測には最先端の計測技術が必要となってくる。以下にATFで開発中あるいは使用中の計測装置について報告する。

3.1 リング内ビームのレーザーワイヤーモニターによる測定

リング内でのエミッタンスモニターとして北直線部にレーザーワイヤーによる Y 方向のビームサイズ計測装置開発が京都大チームとの共同開発で行われている。このレーザーワイヤーは小電力 CW レーザーを用いオプティカルキャビティーによりフォトン蓄積した $1 = 6\mu\text{m}$ のワイヤーをつくり出す。レーザー装置自体を Y 方向に動かしビームをスキャンするが、その時発生するビームとのコンプトン散乱後の線を下流検出器で検出しビームサイズを計測する。線の生成率が低いのでビーム計測はリングにビームを蓄積し線計数蓄積で行うのでライフの短い大電流領域は計測できないが、小電流領域ではきれいなビームプロファイルが計測できている。ここ 1 年の改造によりレーザー出力およびオプティカルキャビティーの Q 値改善がなされ S/N 比が 0.5 から 4 に増大させる事ができた。またシングルフォトンカウンティング回路を導入する事によってマルチパンチの各パンチのプロファイルも計測できるようになり、エミッタンス計測の主役となりつつある。

3.2 リング内ビームの X 線 SR モニターによる測定

もうひとつのリング内エミッタンスモニターとして SR 干渉モニターを使用しているが、その測定値は光学系の繊細な調整が必要でありミラーなどの振動の影響を受けやすくビームサイズの小さいところでは信頼性は高くはない。一方、波長の短い X 線 SR 光を使ったビームプロファイルの直接観測が東大物性研チームから提案され共同開発する事となった。X 線 (3keV) の結像には微細加工技術の進展により実現可能となったゾーンプレートが使われている。波長は 0.38nm、ゾーンプレートへの SR 光の発散角は 0.15mrad であり、それらからの分解能限界は 1.5 μm 程度となるので 6 ~ 8 μm のビームサイズ測定には十分である。2001 年夏から X 線ビームラインが設置され 2002 年 5 月になって周回ビームのイメージングに成功した。まだ詳細な調整や検討が必要であるが、きれいなビーム像が X 線 CCD 上に観測されており、可視光での回折限界約 50 μm を下回るサイズである、X 方向 46 μm 、Y 方向 10 μm という測定値が得られている (図 1)。今後リアルタイムエミッタンスモニターとして立ち上がる事が期待されている。

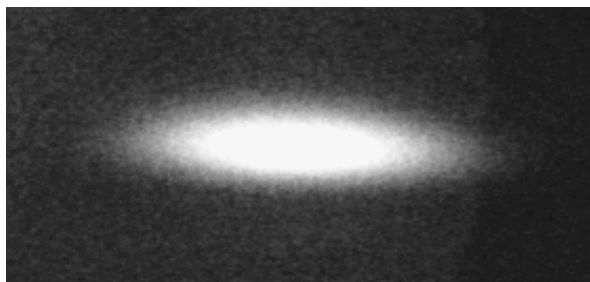


図 1 : X 線 SR 光によるビームプロファイル

3.3 取り出しビームのタングステン (カーボン) ワイヤーモニターによる測定

取り出しラインのワイヤースキャナーは現在 10 μm 径のタングステンが使用されており、最小 6 μm のビームサイズが測定されている。これらのワイヤーモニターによるエミッタンスはリングのレーザーワイヤーよりやや大きめに測定されており、取り出しラインに存在する X-Y カップリングによるものと推測されている。その X-Y カップリングの原因をさがす努力は継続的に行われているが取り出しキッカーあるいは取り出しセプトまわりと推定されている。一方、マルチパンチのビーム強度が上がるとタングステンワイヤーのブレイク (破断) が心配されるので、7 μm 直径のカーボンワイヤーが使用できるかどうかのテストが行われた。その結果、ビームとワイヤーとの衝突からの制動線の生成がタングステンと比べ 1/100 ではあるが線検出器 PMT の HV を 200~300V 上げてゲインを上げる事で対応でき、問題なく使用できる事がわかった。今後のマルチパンチ大強度ビームで使用されるであろう。

3.4 遷移放射を用いたビームサイズモニターによる測定

可視光領域での遷移放射を高倍率拡大光学系にてイメージングする事によりビーム像を直接観測する OTR モニターは SLAC チームが研究開発を行っている。これは鏡面加工されたターゲットにビームを直接あてその表面からの遷移放射光を拡大光学系で撮像するもので光学系は 2 μm の分解能を持っている。このモニターでは最小 4 μm のビームサイズを観測できている。またビームの傾きも容易に観測可能であり、取り出しラインでのリアルタイム 2 次元モニターとして実用化されている。Q スキャンによるエミッタンス計測値はタングステンワイヤースキャナーと概ね一致している。残念ながらビーム衝突による放射線を出すので長時間や大強度ビームには使用できない。また、大強度ビームに対してはターゲット表面にダメージが観測されるなど、制限が多い。

3.5 回折放射を用いたビームサイズモニターの開発

遷移放射光はビームを金属ターゲットにぶつける時に放射する光であるが、回折放射光は金属ターゲットの端ぎりぎりのところをビームが通過したときに金属端から放射される光である。したがってこの光を利用してビームサイズモニターが実現すれば、ターゲットにビームダメージはなくなかつ不要な放射線発生もなくなる。この原理実証をするべく回折放射ビームサイズモニターの提案が東京都立大とトムスク大よりなされ ATF と共同開発を行っている。回折放射光の検出光学系は性質のよく知られた遷移放射を利用して校正を行い、その後ターゲット端より 100 μm 程度離れたところをビーム通過させ回折放射光を観測するという手法で研究を進めている。

ビームがターゲットに当たっているかどうかはワイヤースキャナーの線検出器をモニターしながら行っている。可視光領域での回折光自体は世界に先駆けて2001年12月に観測した。現在は回折放射光の角度分布や偏光などを詳細に調べており理論との一致を確認している。ビームサイズモニターとしての開発点は100 μm 以下の薄い金属ターゲットの作成であり、そのターゲットは端部が10 μm 程度以下で直線状にそろっていないと行かないし、ターゲット表面は鏡面でありかつ平面性がよくなければならぬ。現在各種ターゲットを試作中であり今後ビームテストを行っていき最良のターゲット材料と加工方法を探していく予定である。

3.6 空洞型高分解能ビーム位置モニター

Y方向エミッタンス計測値の算出には、計測されるビームサイズからディスパージョンの寄与を抑制しなければならない。取り出しラインのワイヤースキャナー領域でのX、Yディスパージョンを5mm以下に調整すれば、ビームサイズへの寄与を3 μm 以下にできる。この時この領域でのディスパージョンを1mmの精度で検出するためには2.7 μm の軌道偏差を検出する必要があり、高分解能なビーム位置モニターが必要となる。BINP研究所との共同開発である空洞型ビーム位置モニターは最高分解能が0.2 μm という高分解能で精度よく軌道変位測定が行われており、ディスパージョン調整を容易にしている。

3.7 リングビーム位置モニター回路の改善

リング内におけるビームベースアライメントにはビーム位置モニターの性能がキーポイントとなってくるが、現在ダンピングリングの位置モニターのシングルショット分解能は20~30 μm と通常の蓄積リングより1桁以上悪い。さらにオンライン校正ができないため時間経過とともに測定値の絶対値の信頼性は落ちていく。これらを解決するために、低コストで高性能なBPM回路の開発が継続的に行われてきていて2002年6月に解決のメドがたった。また校正用の疑似ビーム信号発生回路も開発された。この開発された回路を使用するとシングルバンチ 1×10^{10} のビーム強度時に位置分解能は3 μm となり、現在使用している回路の1/10の分解能である。また疑似ビーム信号発生回路を使用したオンライン校正システムも組み込めるようになってきている。2002年6月にはビームテストも行われ、実際環境下で問題なく標記の分解能を得る事ができた。この回路およびオンライン校正システムが稼動するのは2003年1月頃と計画している。

4. マルチバンチフォトカソード RF ガン

熱電子銃からのマルチバンチ発生では各バンチ強度はバンチング性能の問題からシングルバンチ時の約1/3が現状最大である。またグリッドにかけるバーストRFの立ち上がり、立ち下がりやミスマッチなどにより各バンチ強度は不均一となっている。こ

れらを解決し 1×10^{10} 程度で20バンチの均一強度ビームをリングに損失なく入射できる電子銃としてマルチバンチフォトカソードRFガンを開発している。2001年7月~9月におこなったシングルバンチフォトカソードRFガン試験ではリングに 1×10^{10} のビームを損失なく入射できたので、本年夏に行うマルチバンチ試験は十分期待できる。シングルバンチ時は銅カソードを用いたが、必要なレーザー出力はパルスあたり40 μJ 程度とかなり大きいものであった。マルチバンチでこのような出力をだすのはコスト的技術的にも困難であるので、CERNやDESYで実績のある量子効率の高い、高電界RF場中でも量子効率寿命の長い Ce_2Te カソードを使用し、レーザー出力を2桁下げる方法をとる事とした。このためフォトカソード研究に実績と経験の深い名古屋大チームと共同でカソードのロードロックシステムを開発する事となり現在製作中である。RFガン空洞はBNL型のカソード端板を改造する事で、交換可能なフォトカソードを取り付けられるようにした。空洞はKEKのワークセンターで加工から口付けまで行い高精度な空洞を製作した。一方、マルチバンチレーザーは放医研のチームの協力を得る事ができATFでの共同試験が可能となった。本格的なビーム発生およびリング入射試験は2002年9月から行う予定で現在準備中である。

5. 今後の課題と展望

マルチバンチのエミッタンスはシングルバンチ時の2倍というところまで下げる事ができているが、その原因についてはいまだ推測がついていない。ファーストイオン、カップルドバンチなどの各種のインスタビリティーを考慮して高速高精度なモニターを整備していかなければならない状況である。マルチバンチビームの強度不足についてはマルチバンチフォトカソードRFガンが解決するであろうと考えている。リングのビームベースアライメントのために導入される高分解能BPM回路およびオンライン校正システムは軌道測定を10倍以上高精度化するであろう。また、各種モニターも鋭意開発改善中であり今後一層の高分解能、高精度、広帯域化(バンチ毎測定)が進む予定である。

6. 謝辞

ATFの運転維持および開発研究はシフトに参加しビーム開発を担当して下さる皆様と、技術サポートをして下さる(有)イーキューブ、(株)関東情報サービスの方々によって行なわれています。あらためてここに感謝致します。さらに、本著者は菅原機構長、木村物質構造科学研究所長、神谷加速器研究施設長、黒川加速器総主幹、榎本加速器第3研究系主幹、高田教授の方々のご理解とご指導に感謝致します。また、ここに報告しましたATFの研究開発が皆様の研究の一助にでもなれば幸いです。