

氏名 齋 藤 一 義

学位（専攻分野） 博士（工学）

学 位 記 番 号 総研大乙第13号

学位授与の日付 平成8年3月21日

学位授与の要件 数物科学研究科
学位規則第4条第2項該当

学 位 論 文 題 目 X-band Prebunched FEL Amplifier

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 高 田 耕 治
教 授 平 松 成 範
教 授 小 早 川 久
教 授 春 田 俊 夫
教 授 北 村 英 男
教 授 齋 藤 宏 文

（宇宙科学研究所）

論文内容の要旨

リニアコライダ用1GW級の大出力高周波源として、XバンドFELは有望な候補の一つである。KEKではその早期実用化を目指し、テストスタンドで基礎実験を進めている。昨年、イオンチャンネルガイディングで1.6MeV-500Aのビームを輸送し、飽和出力100MWのマイクロ波増幅を達成した。しかしながら、出力飽和の位置はウィグラ出力付近であった。

今回新たに建設したプリバンチビーム駆動型FEL増幅装置は、通常のFEL装置にプリバンチャを設置した構成である。その特徴はプリバンチした入射ビームのFEL相互作用にある。本装置には二つの目的がある。一つは、マイクロ波出力の成長を速め、短いウィグラ長で飽和出力を達成することである。最終目標はウィグラ磁場のテーパ化により出力を増強し、装置の高効率化を実現することである。二つめは、TBAの多段FELの実験的シミュレーションを実現することである。すなわち、バンチした入射ビーム特有の物理現象を調べることである。本研究では出力マイクロ波の位相調整に注目し、それが入力マイクロ波の位相変化にどれだけ追従するかを測定した。なお、MW級の出力を目標としたプリバンチビーム駆動型FEL増幅装置は本装置以外例を見ない。また、TBAの重要課題である出力マイクロ波の位相調整に関する実験も他に例を見ない。本研究ではプリバンチビーム駆動型FEL増幅装置の設計、シミュレーションによる性能評価、実験による検証を実施し、さらにTBAに関連するマイクロ波位相調整について考察した。

まず、誘導型電子銃、磁場ガイディング装置、プリバンチャを設計した。プリバンチャとして空洞を使用するためビームラインの高真空化が要求される。そこで、従来のイオンチャンネルガイディングの代わりに磁場ガイディングを採用した。電子銃もそれに応じて磁場ガイディング用に最適化した。磁場ガイディング装置の設計では以下の二点に留意した。一つは、空洞の二次電子放出による異常負荷を避けるため、空洞部でのビーム損失を極力抑えること。二つ目は、ビーム損失およびエミッタンス増大を避けるためウィグラ入射部でのビーム軌道および位相空間の整合を良くすることである。設計では、電子銃から出射される1.6MeV-800Aのビームをウィグラ出口まで安定に輸送できる。プリバンチャの設計では以下の三点に留意した。第一に、ビーム輸送が困難にならないこと。第二に、空洞の高周波放電を避けること。第三に入手しやすく簡単な高周波源で済むことである。その結果、クライストロンの入力空洞と利得空洞に相当する二つの空洞を用いたプリバンチャ(軸方向変調方式)を採用した。また、それぞれノーズコーン無しのピルボックス型空洞とした。設計では利得空洞で70keV以上ビームをエネルギー変調(速度変調)できる。

次にシミュレーションにより装置の性能を評価した。ウィグラへの入射ビームの電流変調度(密度変調度)を、一次元をディスクモデルおよび三次元粒子トラッキングにより計算した。また、FEL動作性能を一次元および三次元FEL計算により評価した。その結果、電流変調度30%以上の入射ビームが得られ、ウィグラ長1.3m以内で飽和出力120MWを達成しうることがわかった。

さらに、装置の動作特性を以下の三段階に分けて実験的に検証した。第一段階はビーム輸送実験である。本実験では電子銃の電極間隙、磁場ガイディング装置(ソレノイド電磁

石、四極電磁石、ステアリング電磁石)の励磁量、およびウィグラ磁場を最適化した。第二段階はプリバンチャの性能評価の実験であり、高電力試験についてビームを実際にプリバンチャした。本実験ではウィグラ入射点に出力空洞を設置し、そのマイクロ波出力から電流変調度を測定した。第三段階はFEL動作特性を評価する実験である。本実験ではプリバンチャビームをウィグラに入射し、FEL相互作用により増幅されたマイクロ波出力を測定した。

上記実験により以下の結果を得た。まず、ウィグラへの入射ビームとして、エネルギー1.5 MeV、電流値DC 750 A、電流変調度45%のプリバンチャビームが実現できた。なお、ビームエネルギーは誘導線形加速器のセルの絶縁破壊で制限された。電流変調度は入力空洞への供給電力とともに増加したが、利得空洞の間隙電圧が400 kV以上になるとその間隙電圧のパルス幅がビームのパルス幅より減少し始めた。その結果、電流変調度はそのパルス幅減少により実質的に制限された。次に、上記プリバンチャビームをウィグラへ入射した結果、ウィグラ長1.1 mで飽和出力120 MWを達成した。実験で得られたマイクロ波出力の成長は、シミュレーションでよく再現できた。しかしながら、ウィグラ部のビーム輸送に重大な問題があり、ウィグラ磁場を高くするとビーム損失が大きくなる。そのため、最大出力を与えるウィグラ磁場(1.25 kG)は共鳴磁場(~1.4 kG)よりかなり低い。ウィグラ磁場のテーパ化によりマイクロ波出力の増強を試みたが、出力を飽和値以上には増強できなかった。それは上記ビーム輸送の問題があり、バンチャを十分維持できるはずの共鳴磁場付近で逆にビーム損失が大きいためと考える。

最後に、TBAの重要課題である出力マイクロ波の位相調整に関する実験を実施した。TBAを構成する多段FELの出力マイクロ波の位相は、理想的には各段ごと独立に調整できねばならない。即ち、各段ごとに出力マイクロ波の位相は入力マイクロ波の位相に追従すべきである。しかしながら、実際は駆動ビームがバンチャしているため、その自発放射により出力マイクロ波の位相が決定されてしまう。本実験ではその現象を実現するため、入力マイクロ波をプリバンチャビームでFEL増幅した。その際、入力マイクロ波の位相を変えて出力マイクロ波の位相の調整可能範囲を測定した。その結果、60 kWの入力マイクロ波では入射ビーム(1.5 MeV-500 A)の電流変調度が30%を越えると、出力マイクロ波の位相調整が可能な範囲は40度以下に制限された。しかし逆にこの結果は、MW級のマイクロ波を入力すれば実際のTBAでも数度の位相調整が可能であることを示唆する。

齊藤一義君は、リニアコライダの基本的な方式の一つであるTBA (Two Beam Accelerator) について、そのマイクロ波源部分であるFELについて研究した。本論文はMeVエネルギーでkA級の大電流をウイグラーに入射し、Xバンド周波数で100MWを越えるFEL増幅電力が得られたことを論じたものであるが、入射ビームとして、あらかじめバンチ(プリバンチ)されたものを世界ではじめて試みたところに特色がある。さらにこの結果をふまえ、リニアコライダに必要な1GW級のマイクロ波電力を得るために、ウイグラーを周期的に配列する多段FEL構成した場合の基本的な問題点の研究がなされている。

齊藤君の研究は次のように要約される：

(1) システムを構成する電子銃、プリバンチ用高周波空洞、バンチングのためのドリフト管、ウイグラー入口での位相検出器、ウイグラー、出力空洞、ビームトランスポート用コイル群について、それぞれの最適化設計を行った、

(2) ついで、システム全体について総合的なビーム軌道シミュレーションを行ったが、その際、1次元ディスクモデルによる、おおよその最適化条件のもとで、独自に開発した3次元コードで多粒子軌道追跡を行い、FEL出力の見積りを行った、

(3) このような理論的検討のうえでビーム実験を行い、45%の変調度をもつ1.5MeV、750Aのビームからシミュレーションをよく再現した120MWを得ることができた、

(4) リニアコライダに応用するために多段FEL構成した場合、各段の出力マイクロ波位相が十分な精度で制御されなければならないが、そのためのひとつの手段として、入力位相を変調したときの出力位相の相対的変調度をシミュレーションおよび実験で精密に検出している。

齊藤君の研究の優れた点は、周到な考慮を経て設計、組み立てられたXバンドFEL装置により、世界初のプリバンチビームによる120MW出力というすばらしい記録を達成したことにある。これはリニアコライダ用マイクロ波源へのFEL応用の可能性を確かにする極めて重要なものである。またシミュレーションとのよい一致を見ていることは、同君が大電力マイクロ波技術という極めることが必ずしも容易ではない分野において、一定の水準に達していることを証明している。

しかしながら本論文で齊藤君が最も力を注いでいるのは、出力位相の制御可能性である。リニアコライダ用マイクロ波源としてのFELはその位相安定性が問題であり、特に多段構成ではなお更であると指摘されてきた。この研究によってその点が定量的に明らかにされたことは、単なる大出力記録を越えた、極めて高い技術価値を持つものといえる。