日本大学電子線利用研究施設の現状

佐藤 勇^{A)}、早川 建^{A)}、田中俊成^{A)}、早川恭史^{A)}、横山和枝^{A)}、

菅野浩一^{B)}、境 武志^{B)}、石渡謙一郎^{B)}、中尾圭佐^{B)}、長谷川 崇^{B)}、宮崎慎也^{B)}、

福田茂樹^{C)}、榎本收志^{C)}、大沢 哲^{C)}、設楽哲夫^{C)}、諏訪田 剛^{C)}、古川和朗^{C)}、道園真一郎^{C)}

^{A)}日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎

^{B)}日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎

^{C)}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

日本大学では、普通の電子線形加速器の高度化を進め、 2001年5月、1.5 μ m波長のFEL発振に成功したが、 FEL発振は非常に不安定であった。加速器とFELシステ ムの不安定要素が複雑に絡み合っていたが、これらの要因 の1つ1つを克服し、2003年9月には、1.2~5 μ m 波長のFEL発振安定化に成功し、10月には、共同利用実 験を開始する。

1 はじめに

日本大学電子線利用研究施設(LEBRA)¹⁾では、1994 年度に電子線形加速器とFEL発生装置の建設^{2,3)}を開始し、 1998年1月90MeV、20mAの電子ビーム加速に成 功、同年2月、自発放射光を観測した。更に同年10月入 射部集束系を強化し、電子ビームは220mA に達した。 しかしながら、短パルス用クライストロン(PV-303 0)を長パルスで使用する試みは出力窓が破損するために 困難を極めた。又、故障が多発し、電子ビームも不安定で あった。そこで、KEKの協力を得て、電子ビームの高性 能化と高安定化を目的とする加速器の高度化を進めるこ とになった。更に、1999年9月、アンジュレーターの 永久磁石が放射線損傷4)を受け、使用が不可能になり、赤 外線用永久磁石の製作を開始した。一方、同年11月には、 加速器運転中でも実験室で準備作業ができるように加速 器室と実験室の間の放射線シールドを強化した。2000 年3月に赤外線用アンジュレーター永久磁石が納入され、 1.5 µmの赤外線FELの基礎実験を再開した。

同年4月、学術フロンティア推進事業が認められ、新実 験棟(1320m²)、レーザービームライン、パラメトリ ックX線源、X線計測装置等の建設を開始し、2001年 4月に完成した。

この工事期間、加速器運転を一時停止したが、同年4月 に再開し、同年5月には $1.5 \mu m$ のFEL発振に成功した。 その後、FELの強度は蓄積光の約 10^8 を越えたが、F EL発振は不安定で継続できず、又、飽和には到らなかっ た。FELの不安定要因を、色々な角度から徹底的に追究 し、2003年9月には、 $1.2 \sim 5 \mu m$ 波長領域でFEL 発振が実現し、そのエネルギーは最大30 m J/パルスに 達し、且つ、発振も安定になった。念願の共同利用実験も 間近に迫っていることを実感している。

2 電子線形加速器の高度化

短波長FELでは、低エミッタンス、高輝度、低分散で 長パルスの電子ビームが安定に供給されなければ、その目 的は達成できない。電子加速器を有する多くの研究機関が 短波長FELに挑戦し、大多数の研究機関が未だにその目 的を達成できない状態にあり、或いは早々に撤退したのは この理由による。

既設の電子加速器施設と普通の電子線形加速器を活用 し短波長FELに挑戦する日本大学計画は、建設費やマン パワーも少なく、その実現化は困難を極めた。専門家の間 では、無謀で実現不可能であろうとの世評もあった。

本研究施設では、寄せ集めの部品で構成された電子加速 器で、どのようにしたら、高品質の電子ビームを加速でき るかが最大の研究課題であり、事実、多くの故障や予想外 の障害に遭遇した。

特に、クライストロン(PV-3030)は短パルス(2.5µS)用で あり、パルス持続時間が 10µs を超えると出力窓は確実に 破損し、このクライストロンで短波長 FELに必要な20 µSを確保する見通しは絶望的であった。その上、クライ ストロンのヒーター絶縁トランス、パルストランス、バッ クダイオード等の構成部品に故障が続出し次々に破損し た。更に、加速器の動作が不安定でFEL発振に必要な基 礎実験すらできない惨憺たる状態であった。

しかしながら、1999年2月にクライストロン(PV -3030)を長パルスで稼働させる方法を×ス化に成功 した。一方、同年4月、学術フロンティア推進事業が5年 計画でスタートし、同年7月から12月まで5ヶ月間、実 験棟増築工事のため、加速器運転を停止した。この期間に、 懸案の加速器高度化が積極的に進められ、短波長FEL実 現の障害になっていた半導体高周波増幅器の位相シフト 化、熱陰極電子銃の低エミッタンス化、電子ビームの簡易 エネルギー昇降化、ビーム位置モニター非破壊化等の改善 作業を実施した。更に、学術フロンティア推進事業のFE Lビームライン、パラメトリックX線源、X線計測装置等 の開発作業、並びに、長パルス大電力クライストロンの開 発、FEL用ビーム拡張装置の開発、バンチ計測システム の整備等をKEKの協力の下に平行して進められた。 2001年1月に加速器運転を再開し、クライストロン は懸案の出力電力×パルス持続時間×繰り返し数=20 MW×20 μ S×12.5Hzを達成し、パルス持続時間内 の位相シフト量を縮小することは達成できたが、依然とし て、電子ビームは不安定であった。

3 加速器の不安定要因

線形加速器の直線部では加速器の不安定要因は出現し にくいが、この電子ビームを電磁石で大きく偏向し軌道を 厳しく制限すると、加速器の不安定性の要因は、ビーム軌 道変動やビーム電流変動となって計測される。特に、日本 大学のFEL装置には電子線形加速器の加速電子ビーム が90度偏向後に入射されるので、加速器の不安定要因が 如実に現れる。

不安定性を詳細に分析すると、短時間変動と長時間変動 に分類され、変動要因としては、電気的変動、機械的変動、 室温や冷却水温度の変化等が、複雑に絡んでいた。特に、 マクロパルス内の変動は半導体高周波増幅器の高周波位 相変調、パルス毎の変動はPFNとクライストロンのイン ピーダンス不整合(ミスマッチ)に加えてクライストロン・ パルサーのPFNへ充電中の直流高電圧変動が変動を更 に増長させていたが、その他、色々な要因も含まれていた。

電気的変動「交流入力電圧変動」

交流入力電圧変動は全装置に共通する課題であり、FE L発振以降は特に丹念に調査した。その結果、夜の21時 から翌朝の9時まで約12時間は、変動周期が早いことが 明らかになり、この時間帯で自由電子レーザー発振の安定 性を継続することは不可能であった。この異常電圧変動を 東京電力と共同で調査したが、その原因の出所を突き止め ることは出来なかった。又、全電源変動を同時に監視する ことは不可能であり、ビーム不安定に最も影響力の大きい 装置を選択して、連続測定を行った。特に異常な電源は見 付からなかった。

「高周波位相シフト」

クライストロンの前置増幅器である半導体高周波増幅 器はパルスで動作するが、稼働して10µSを経過すると 位相が約10度ずれた。当面の対応策は、単位時間当たり の位相ずれを計測し、入力高周波位相を逆にシフトさせ、 位相シフトを1度程度に押さえ込み、90度偏向ビーム輸 送路によるビーム損失は大幅に改善され、最初のFEL発 振を可能にした。室温変動による遅い位相変化は位相負帰 還回路を付け加えて抑制した。しかし、不規則であるが、 パルス内とパルス毎の位相シフトは観測され、位相シフト の少ない半導体素子を用い長パルスでも位相シフト小さ い高周波増幅器を開発し導入した。その結果、パルス内の 高周波位相シフトは更に抑制され、パルス持続時間内のビ ーム・エネルギー変動^のも改善された。

「サイラトロン動作の揺らぎ対策」

クライストロンパルサーのサイラトロンは動作停止時 刻に揺らぎがあり、これがパルス電圧の要因と思われてい たが、PFNインピーダンスとクライストロンインピーダ ンスのミスマッチと直流高電圧変動が主要因であり、微調 整した結果、サイラトロンの遮断時刻の揺らぎは解消した。

「高圧直流電源の改造」

モジュレーターの高圧直流電源は3極真空管を使って 高精度に制御されるので、パルサーにはDeQ回路を採用し なかった。しかし、サイラトロンが動作する直前の充電コ ンデンサー電圧は常に一定であったが、PFN電圧は入力 交流電圧変動に依存していた。負荷の電圧降下が大きいP FN充電中は、高圧直流電源の電圧制御が不能になり、交 流入力電圧変動に対応していなかった。充電コンデンサー を補充し負荷電圧降下を小さくし、高圧直流電源とパルス 発生装置間のシリーズ抵抗を大きくした結果、パルス毎の ビーム・エネルギー変動は大幅に改善された。

4 FEL 発振の不安定要因

最初のFEL発振は、電子ビームのエネルギーが86. 3MeV、ビーム電流が90mAで達成された。しかし、発 振状態は極めて不安定であった。

機械的変動の主要因は、光空洞共振器架台の脆性にあり 振動は空調機や冷却装置に起因していた。

反射鏡には1.5 μ m波長で反射率が99.5%の狭い帯 域の誘電体多層膜を使用していたが、基本波レーザー強度 が高まると3次高調波強度も高くなる現象が観測されて いた。最も深刻な要因は、FEL発振が強烈になった瞬時 に発振が停止することであった。光空洞共振器のパラメー ターを少しずらす再び発振するが、しかし、レーザーが飽 和状態は観測できなかった。この一過性発振の要因は、光 空洞共振器の反射鏡面が瞬時に破損するのではないかと 推定したが、これは蓄積光の減衰から算出した反射率が時 間経過と共に次第に低下する事実と矛盾していた。そこで、 反射鏡を取り出して調べることになった。反射鏡は、上流 下流ともに多層膜が痘痕状に破損していた。これは強いレ ーザー発振が継続できない大きな要因であった。

「光空洞共振器架台の強化」

電磁石等の冷却水を循環させるとその振動が光空洞共振器反射鏡架台に伝達し、架台は最大振幅が 0.6μm 固有振動数が約8Hzで振動していた。これは架台の剛性不足が原因であり、FEL 発振の不安定要因の1つになっていた。 光空洞共振器架台に鉄板を貼り付けた結果、最大振幅は20nm、固有振動数は約30Hzになり、剛性は大幅に改善きれた。

「ビーム電流の変動対策」

小径熱陰極の活用とウエーネルト構造の最適化によっ て、電子銃低エミッタンス化に成功しFEL発振に寄与し た。しかし、不規則なビーム電流変動が観測され、電子銃 の絶縁耐圧不足を示唆していた。電子銃の支持パイプを細 くし放電耐圧を上げ、グリッド制御の応答時間を早まるよ うに回路構成を改良し、ヒーター電流を空間電荷制限領域 に設定し、更に、電子銃、イオンポンプを交換した結果、 ビーム電流の鋸歯状変化は消滅し不規則なビーム電流変 動は大幅に改善された。 「FEL発振の一過性対策」

光空洞共振器の反射鏡を大電力に耐性の高く可視光領 域でも反射率が高い銀蒸着金属鏡に交換した結果、一過性 のFEL発振現象は消失し、波長領域も1.3~5 µmに広 がり、飽和と思われる現象も観測されており、発振は比較 的安定になった。

5 研究施設の現状

1)30MWクライストロン(PV-3040N)テスト実験

クライストロンが破損し、新クライストロンに交換した。 20MW×20 μ S×5Hzの耐久テストをクリアした。

2) ビーム位置モニター

電子ビームの中心位置を±0.1mmの精度で常時電子 ビームの位置観測が可能である。電子線形加速器に4台、 FELシステムに4台が設置され、FEL発振にその威力 を遺憾なく発揮している。

3) レーザービーム輸送システム

ビーム・エックスパンダーが加速器室に設置され、FE L発生装置と新実験棟のレーザー照射室を結ぶレーザー ビームラインが貫通した。特にビーム・エックスパンダー は、楕円鏡と放物線鏡の組み合わせ、レーザービームを平 行ビームにする装置であり、優れた性能を発揮している。

4) パラメトリックX線源の整備

パラメトリックX線発生装置は既に完成し、加速器室に 設置されており、このX線源を使う蛋白質X線構造解析装 置やX線回折装置も既に導入された。X線ビームラインの 放射線施設検査に合格後に、本格的テスト実験を行う予定 である。

6 おわりに

日本大学に於ける短波長FEL計画は、高度利用研究を 目的としており、FEL実用化は必須条件であった。又、 短波長FELの実用化には電子ビームの高性能、超安定、長 パルス化が要求されるために、特に通常電子線形加速器の 高度化による短波長FEL実用化は、予想以上に実現の壁が 高かった。更に、通常の電子線形加速器性能限度を超え、 これまでの加速器技術の常識が通用しない世界に踏み込 んだ思いであった。

続発する故障や立ち塞がる性能限界に悩まされたが、これらの問題を1つ1つ克服し、短波長 FEL の実用化に耐えうる加速器が実現しつつある。

参考文献

- I.Sato, et al., Proc. of 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan, 104-106 (1997).
- K.Hayakawa, et al., Nucl.Instr.and Meth. A375, ABS25-26(1996).
- 3) T.Tanaka,etal.,Nucl.Instr.andMeth.A407,II103-104 (1998).
- I.Sato, et al., The 12th Sym. on Accel. Sci. and Tech., Riken, Japan, 37-39(1999).
- 5) Y.Hayakawa, et al., Nucl.Instr.and Mrth.A82002), Vol 483,1-2, pp.29-33.
- 6) K. Yokoyama, et., Jpn. J. Appl. Phys. 41(2002) pp-4758-4759