

産研電子ライナックによる自由電子レーザーを 中心とした強力光源の開発



研究ノート

奥 田 修 一*

1. はじめに

光利用技術の進展に伴い、より強くまた特性の良い光源が求められている。通常のレーザーは原子分子の励起を利用するので波長域が限定され、エネルギーの注入、排出速度も制限される。これに対し、制御の容易な加速器からの電子ビームを利用するものが自由電子レーザー(FEL)で、波長可変性、出力、効率の点ですぐれた特性を持つことが期待されている。

FELは一般に、高エネルギー電子ビームの周期磁場中での蛇行運動で発生する放射光である。通常よりはるかに特性の良いビームを必要とするので構成要素の開発研究が中心になる。欧米では既に得られた赤外のFELを医療、高分子、表面物性など広範な分野の研究に利用するとともに、技術的により困難な可視からさらに短波長のFELの開発研究が行われている。しかし我国における研究は大きく遅れ、まず赤外域のFELの利用のために、既存のライナックによる発振実験を早急に行わなければならない。

大阪大学産業科学研究所附属放射線実験所のLバンド線型電子加速器(電子ライナック)は1978年に運転を開始した。時間幅が短く電荷量の多い1個のパルスビーム(シングルバンチビーム)を発生させ、現在までパルスラジオリシスなど放射線照射に伴う超高速過渡現象の解明を中心とした研究に広く利用されてきた。この間加速器の性能の向上をはかり、約20psのシングルバンチの電荷量67nC(ビームピーク電流約

3kA)の世界記録を達成して測定感度の向上に貢献した。最近電子ライナックの利用分野が大きく広がる中で、これまでのような電子ビームそのものの利用に加え、放射光や陽電子などの2次ビームを利用する計画を現在進めている。特に本加速器の特長である電子ビームの高いピーク電流は、干渉性を持つ強力な放射を得るために必要な条件である。

本研究ではこのライナックの特性を生かしてFELなどの強力なパルス光源を開発し、広い分野の研究に利用することを主な目的としている。加速器の特性、本計画の概要、現在までに得られた成果について報告する。

2. 産研Lバンドライナックとビーム特性

ライナックでは通常、電子銃から入射した電子が数100ps毎に集群し個々のバンチを形成する。産研ライナックではこの電子数を増すために3台のサブハーモニックプリバンチャー(SHPB)を用い、4.5nsでパルス入射した電子を1バンチに圧縮する。この結果非常に高いピーク電流を持ったシングルバンチビームが得られる。これに対し数 μ sの時間幅で電子を入射してSHPBを働かせると、初段のSHPBにかけるマイクロ波の周期(9.2ns)毎に連なるバンチ列を持ったマルチバンチビームが得られる。

これら2種類のビームのパルス形状は、空気中でのチェレンコフ光で観測された(図1)。またこれらの特性を表1に示す。シングルバンチビームは特に高いピーク電流が特徴で、rfライナックでは極めて特殊である。またマルチバンチビームとしてのピーク電流も極めて高い。

3. 放射光源開発研究の概要

(1) シングルバンチビームによるコヒーレント

*奥田修一(Shuichi OKUDA), 大阪大学産業科学研究所, 附属放射線実験所, 助手, 工学博士, 加速器科学

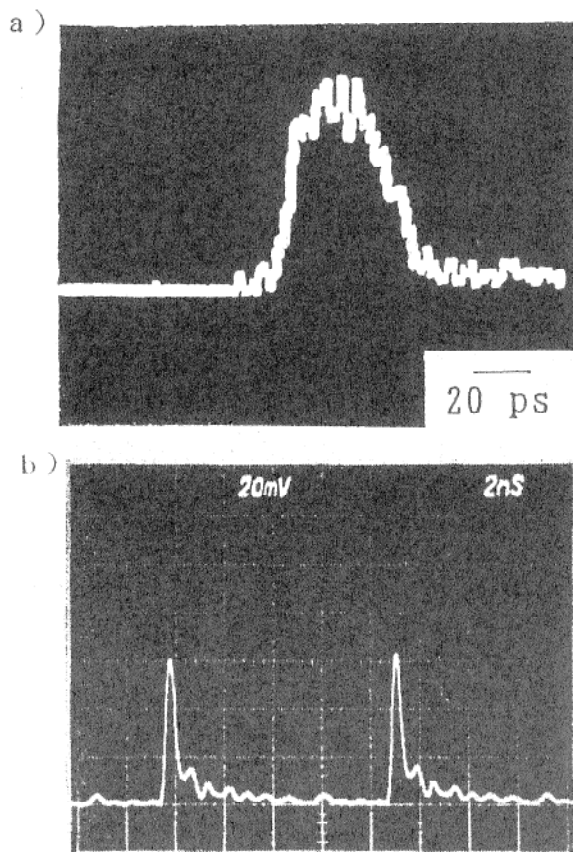


図1 (a) ストリークカメラで観測されたシングルバンチビーム波形
(b) パイロプラナ光電管で観測されたマルチバンチビーム波形

表1 電子ビームの特性

Beam mode	Single ()	Multi ()
Maximum energy	38 MeV	
Accelerator frequency	1.3 GHz	
Micropulse spacing	--	9.2 ns
Charge/micropulse	70 nC	>1 nC
Peak current/micropulse	3 kA	>50 A
Micropulse length	<20 ps	
Macropulse length	2.5 μ s	
Energy spread	2%	
Normalized emittance (π mm.mrad)	200~700	

放射光源 (波長: 数100 μ m ~ 数mm)

最近実験的に検証された連続スペクトルを持ったコヒーレント光で、偏向磁石中のビーム軌道の接線方向に放射される。本加速器ではSR赤外光源に比べて 10^{11} 倍のピーク出力が期待される。現ビーム特性は光源として必要な条件を満足している。

(2) シングルバンチビームによる高利得FEL (波長: 9~60 μ m)

電子ビームがウィグラー (周期磁場を持つ装置) を1回通過する間の自発放射光の増幅, または入射レーザー光の増幅によるFELである。いずれもインダクションライナックによる大がかりな研究がLLNL (米国) で行われている。本研究ではビームのピーク電流はそれらに匹敵し, ビームの質の悪さの指標であるエミッタンスは1桁以上低い。この種のFELで新しい知見が得られることが期待される。

(3) マルチバンチビームによる低利得FEL (波長: 9~60 μ m)

光共振器の概略を図2に示す。電子ビームの各バンチによって放射光を繰返し増幅することにより, 最終的に数MWのピーク出力を持つFELが期待される。光源として広い波長域をカバーするためには, ビームのエミッタンスの改善が必要である。

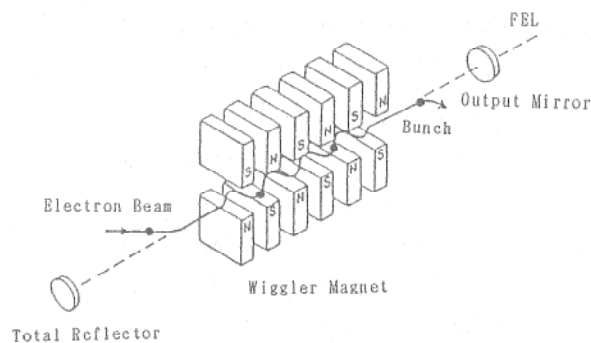


図2 光共振器とFEL発振機構

4. 加速器システムと構成要素

FEL実験のためのビームトランスポート系の設計は現在完了しており, これを加えた加速器システムの概略を図3に示す。新しいトランスポート系は, 共振器の設置, レーザー光の導入, 放射光の計測のために, 加速管の中心軸からはずれて設置される。2度の偏向によるビーム特性の劣化を補償するために集束装置が追加される。

既存のHalbach型ウィグラー2台のパラメータを表2に示す。ウィグラー中での電子の軌道は計算コードを作成して求めた。

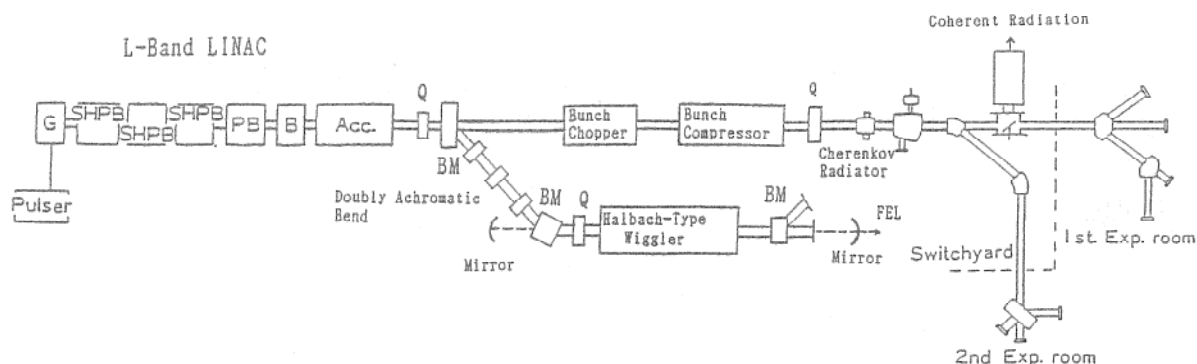


図3 加速器システム

表2 ウィグラーパラメータ

	Wiggler I	II
Length	192 cm	48 cm
Period	6 cm	4 cm
Number of periods	32	12
Magnet material	Nd-Fe-B	SmCo ₅

5. 研究の現状

現在までに電子ビームの特性を測定し、シングルバンチビームからの放射光を観測した。コヒーレント放射光の測定は、空气中に設置した永久磁石でビームを曲げ、液体He冷却Siボロメータで行った。波長1mm以上にピークを持つパルス光が得られた。今後、放射過程の解明が課題である。

ウィグラーからの波長約11 μm の自発放射光のスペクトルを液体窒素冷却のHgCdTe検出器で測定した。ビーム条件の改善による利得の向上と、レーザー光の増幅実験を今後行う予定である。またパルス放射光は波長可変で、電子ビームとの併用によるパルスラジオリシスが可能である。

マルチバンチビームによる発振実験は今年度末以降に予定されている。

6. おわりに

放射光源の開発には加速器を含めて膨大な予算が必要である。本実験所では、加速器システムの特殊性が放射光源に最適なものであることがわかり、若干の改良によって研究の一線に並ぶことができると考えられる。ただ将来、光源として本加速器を活用するにはビームの質の向上が必要である。

本研究は、産業科学研究所附属放射線実験所のFEL開発研究グループを中心に行われている。

参考文献

(産研Lバンドライナックについて)

- 1) 大阪大学産業科学研究所附属放射線実験所要覧 (光源の開発研究について)
- 2) 放射線実験所 昭和63年度年報.
- 3) 放射線実験所 平成元年度年報.
- 4) S. Okuda et al., submitted to J. Nucl. Sci. Technol.