



Title	赤外自由電子レーザーの開発研究
Author(s)	奥田, 修一
Citation	大阪大学低温センターだより. 1997, 98, p. 19-23
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/12344
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

赤外自由電子レーザーの開発研究

産業科学研究所 奥田 修一 (内線 8511)

E-mail: s-okuda@sanken.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

光の利用技術が進み、より良い特性を持った光源が求められている。蓄積リングは、高エネルギー電子を磁場で偏向して出てくるシンクロトロン放射を利用する高輝度な光源である。さらに高い輝度の光を得るために、コヒーレントな放射を増幅するのが自由電子レーザー* (Free-Electron Laser, FEL) で、次世代の高輝度光源として期待されている。

FELは、1970年代よりアメリカで開発研究が進められた。初期には軍事研究が主要な開発目的のひとつであった。現在、紫外から遠赤外の波長域でFELが得られており、赤外を中心に、生物、医学、物性など広い分野において利用研究が行われている。実現がむずかしいX線FELの開発計画も進められている。

産業科学研究所(産研)のLバンド電子線型加速器*(ライナック)は、高強度の単パンチビームを特徴とする、学内共同利用装置である。物質を励起した後の高速過渡現象を解析することが主な研究課題のひとつである。この装置の特別な構成要素と周辺技術を利用して開発を進め、1994年に波長32~40 μm の赤外域で発振に成功した。光領域においてピーク出力がメガワットを超えるFEL装置は、産研のFELを含め世界で10台程である。この開発研究の現状について報告する。FELに関する解説書および産研のFELに関する主な研究論文を、参考文献に掲げた。

2. FELの原理と特徴

一般的なFEL装置の概念図を図1に示す。FEL光増幅の過程は次のとおりである。高エネルギーの電子をウィグラー*と呼ばれる周期磁場装置に入射すると、電子はその周期で蛇行する。この周期運動の結果、シンクロトロン放射は単色になる。この波長は、電子のエネルギーとウィグラーの条件より決まる。放射の過程で、電子ビームの中に光の波長を周期とする電子密度の濃淡ができ、位相のそろったコヒーレントな光が増幅される。

ライナックでは、マイクロ波の周期的な電場によって電子が加速される。電子ビームは、マイクロパルスがマイクロ波の周期で繰り返されるパルス構造を持っている(図2)。このマイクロパルスの列がマクロパルスを構成する。1つのマイクロパルスの中の電子のかたまり(パンチ)から発生した光を、2枚の凹面鏡で構成される光共振器*の中に留め、後続のパンチによって繰り返し増幅する。この増幅率が光共振器内での光の損失を超えないと発振は観測されない。電子ビームの条件として、パンチ内の

*この印の付いてる語は、後に「用語説明」があります。

電子数が十分多く、バンチ間にばらつきがなく、マクロパルス全体にエネルギーがそろっている必要がある。普通の構成要素からなるライナックは、一般にこれらの条件を満足しない。また光共振器についても、鏡の間隔やおおりの設定に高い精度が要求される。

FELは、その発生原理から、波長が可変である、高出力が得られる、高効率を得られる、などの優れた特徴を持つことが期待されている。

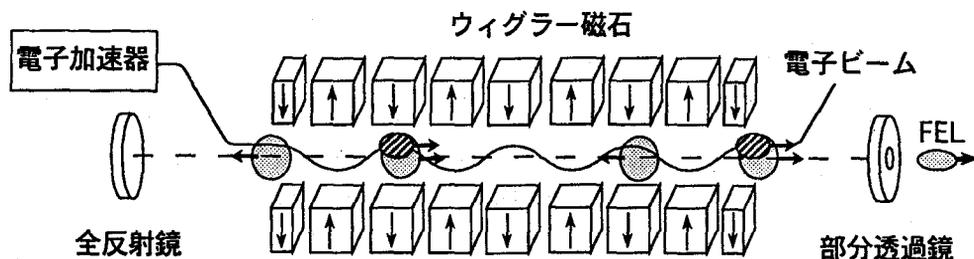


図1 一般的なFEL装置の概念図

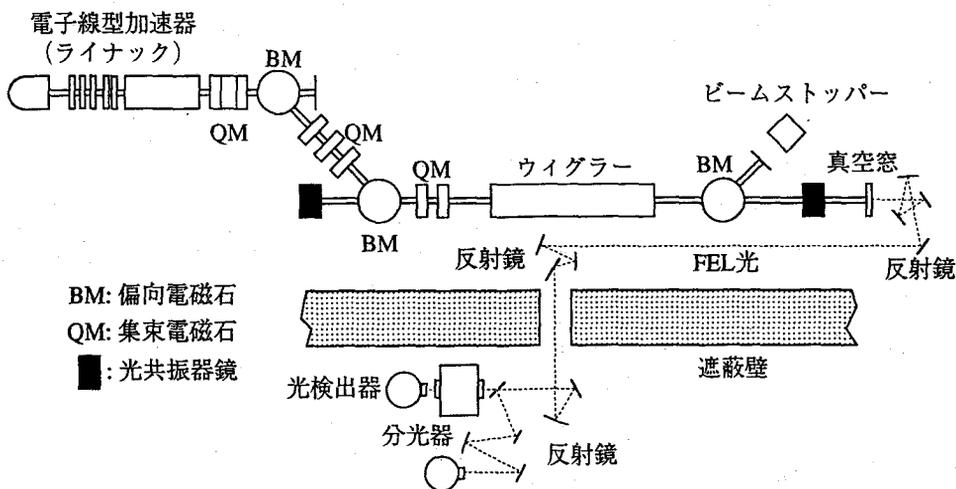


図2 産研ライナックによるFEL装置の概念図

3. 加速器およびFEL実験装置

産研のライナックによるFEL装置の概念図を図3に示す。加速器の最大エネルギーは38 MeVで、バンチ内の電子数を多くするために、パルス電子を時間的に圧縮するマイクロ波装置を合計5台（通常は2台）備えた特殊な構成をしている。世界で最も電荷が多い（最大67nC）、ピコ秒単バンチ電子ビームの発生が可能である。この加速器はFELの専用機ではないので、加速器の一部の要素開発と各構成要素の運転条件に工夫を必要とした。例えばビームの質が良い電子銃を使用するために試験を行い、また複雑なマイクロ波装置のそれぞれの動作条件を最適化してマイクロパルス列をそろえた。

FEL装置は、図3に示したようなビーム輸送系とウィグラー、光共振器で構成される。精度良くビームを輸送するためにビームの位置モニタと電流モニタが配置されている。ウィグラーは、連続的にギャップ間隔を変えて磁場の強度を変化させることができる。これによって連続的に発振波長を変えることが

できる。光共振器鏡には、あおりや位置を高精度でモニタできるシステムを設けてある。この2枚の凹面鏡の間隔は5.5mである。FELのパルス光は、光共振器中を往復するごとに、下流側の鏡の中心に設けられた直径1または3mmφの穴から一部が外部へとりだされて、さらに反射鏡により加速器室外に導かれる。その強度は、液体He冷却のGe:BeまたはGe:Ga光検出器で測定した。図3に示した光計測系は、FEL光のスペクトルを分光器によって測定する配置である。

4. 実験結果の概要

電子ビームは、30~40psの幅を持ったマイクロパルスが時間間隔9.2nsで続く構造を持っている。マクロパルス幅は1.8μsである。電子のエネルギー17.1 MeVで得られるFELの波長は40μmである。下流側の光共振器鏡の位置を遠隔でゆっくりと動かし、光共振器長を変化させると、パルス光と電子バンチが正確に重なる条件で繰り返し増幅が起き、FELの発振が観測される。最初に発振に成功した時には比較的低い出力であったが、この結果を図4に示す。また波長33μmで測定されたスペクトルを図5に示す。これまでに観測されたスペクトル幅は、約1%である。FEL光の波長幅には、主として光のマイクロパルスの時間幅と波長より決まる下限がある。

観測されるFEL光の時間構造をモデルで示すと図6(a)のようになる。実際には光共振器内に4個のパルス光が存在するが、特定の1個からの信号だけを考えている。増幅過程における光強度の増加や、電子ビームのマクロパルスが終わった後の光強度の減衰から、光共振器内における光の増幅率や損失が求められる。出力光の時間スペクトルを、時間分解能170nsの高速型Ge:Be光検出器を用いて測定した結果を図6(b)に示す。この

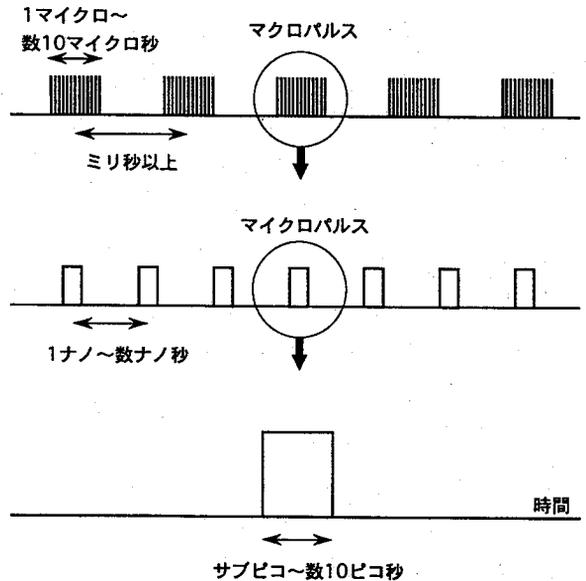


図3 ライナックからの電子ビームのパルス構造

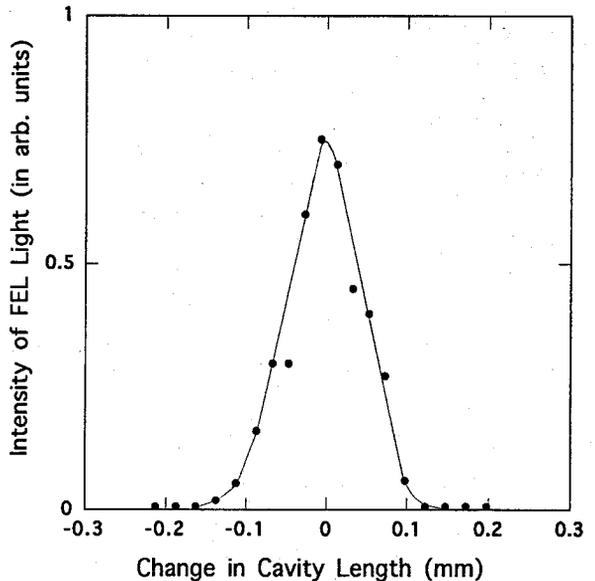


図4 光共振器長に対するFEL出力の変化 (波長: 40μm、出力: 0.03μJ/マクロパルス)

スペクトルから求めたFELの正味の利得（増幅率から損失を引いたもの）および損失は、一往復当りそれぞれ52%、6%である。この増幅率は、FEL装置の中では大きい値である。

現在までに得られた最大のFEL光のピーク出力は、波長40 μm において8.3MW（推定値）である。平均出力は、図2のマクロパルスの繰り返しに依存する。繰り返しを上げた測定は行っていないが、FEL光の出力が安定であれば、最大数ワットが期待される。ただし、比較的大きな増幅率を反映して、FEL光出力のマクロパルス間の変動は現在のところ比較的大きい。また現在、発振波長域は30~70 μm で、近い将来の目標は21~126 μm である。

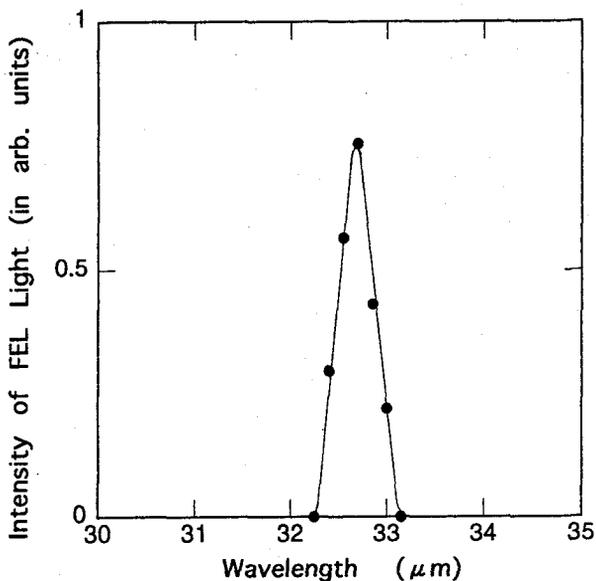


図5 FELスペクトルの測定結果（共振波長：33 μm 、出力：0.03 μJ /マクロパルス）

5. 今後の課題

赤外では、既存のレーザーで高出力が得られていない波長域がある。また、産研のFELの波長域では、世界で数台のFEL装置しかない。FELの特徴として、波長可変、短パルス、高ピーク出力、電子ビームと同期したパルス光であることなどがあり、今後これらをかいた利用研究を進めることが重要である。

本研究は、参考文献に示された共同研究者によって行われた。また本研究を行うに当たり、検出器の冷

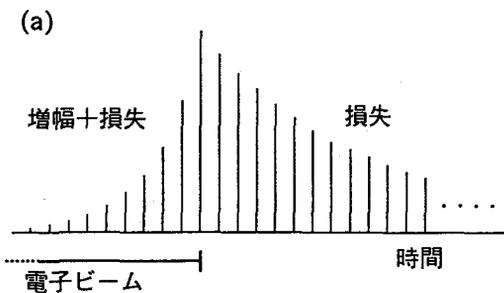
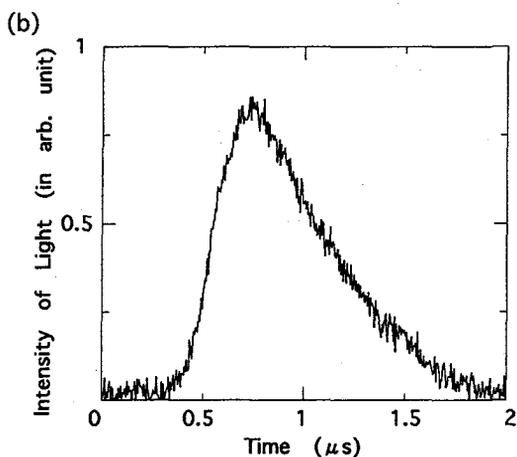


図6 (a) FEL光の出力パルス波形のモデル



(b) 測定結果（波長：40 μm 、出力：800 μJ /マクロパルス）

却に必要な液体ヘリウムを利用させていただいた大阪大学低温センターの皆様には感謝いたします。

参考文献

- [1] 自由電子レーザーとその応用、電気学会自由電子レーザー調査専門委員会編、コロナ社、1990年。
- [2] 入門自由電子レーザー、日本原子力学「自由電子レーザー」研究専門委員会編、1995年。
- [3] S. Okuda, J. Ohkuma, N. Kimura, Y. Honda, T. Okada, S. Takamuku, T. Yamamoto and K. Tsumori, Nucl. Instr. and Meth. A331 (1993) 76.
- [4] S. Okuda, Y. Honda, N. Kimura, J. Ohkuma, T. Yamamoto, S. Suemine, T. Okada, S. Ishida, T. Yamamoto, S. Takeda, K. Tsumori and T. Hori, Nucl. Instr. and Meth. A358 (1995) 244.
- [5] S. Okuda, Y. Honda, N. Kimura, J. Ohkuma, T. Yamamoto, S. Suemine, T. Okada, S. Takeda, K. Tsumori and T. Hori, Nucl. Instr. and Meth. A358 (1995) 248.
- [6] S. Okuda, S. Ishida, G. Isoyama, Y. Honda and R. Kato, Nucl. Instr. and Meth. A375 (1996) 329.
- [7] S. Okuda, R. Kato, Y. Nakajima, G. Kondo, Y. Iwase, H. Kobayashi and G. Isoyama, Nucl. Instr. and Meth. (in press).

用語説明

自由電子レーザー (Free-Electron Laser, FEL)

高エネルギー電子ムビをウィグラー中を通過させ、発生する放射を光共振器中で繰り返し増幅するレーザー。波長可変等の特徴がある。

電子線型加速器 (電子ライナック)

電子を直線的に加速する装置。加速空洞を持つ加速管にマイクロ波を供給し、電子ビームと共に進行する電場を生成して加速する。加速管1メートルあたり通常10~20MeVの加速エネルギーが得られる。

ウィグラー

高エネルギー電子から波長の決まった放射を発生させる磁場装置。一般に、永久磁石を交互に極性を変えて周期的に並べ、向きが周期的に変化する磁場中で電子を蛇行させる。

光共振器

両端に凹面鏡を設置し、レーザー光を安定に依存させる共振器。