特集 3

自由電子レーザー研究における最近の進歩

河 村 良 行*

(1985年11月16日 受理)

Recent Advances in the Study on Free Electron Lasers

Yoshiyuki KAWAMURA*

(Received November 16, 1985)

1. まえがき

本稿では自由電子レーザー(以下Free Electron Laserを略してFELと略記する)に関する研究のうち最近の進歩を中心に述べる。FELに関する一般的な説明はこれまでにいくつかの詳細な解説があるので¹⁻⁶⁾、ここでは簡単な解説のみを行う。

1977年に米国スタンフォード大学の研究グループが、良質の電子ビームを発生出来る電子ライナックを電子ビーム源として3.4 μm の波長のFEL発振に成功して⁷⁾、FELに対する関心が急速に高まった。1983年にはフランスのパリ大学の研究グループが電子蓄積リングを電子ビーム源として可視(6500 $\text{\AA}$)のFEL発振に成功し⁸⁾、1984年にはカリフォルニア大学サンタバーバラ校(UCSB)の研究グループがエネルギー回収形のバンディグラフを電子ビーム源として遠赤外域(400 μm)のFEL発振を行っている⁹⁾。

また、これらとは別の流れとして、大電流相対論的電子ビームを電子ビーム源として強力なミリ波からサブミリ波のFEL発振を得るため

の研究が、米国のNaval Research Laboratory コロンビア大学、MIT、ヒューズ研究所、ローレンスリバモア研究所等の研究グループで1970年頃から行われて来ており、かなりの成功をおさめている。

前者の様に、原子核物理学研究用に開発された、リニアック、蓄積リング、バンディグラフ等の高エネルギー微小電流電子ビーム源(>10 MeV, <1 A)を用いた方式は、コンプトン型FEL、後者の様に、レーザーガス励起、プラズマ加熱、等のために開発されて来た低エネルギー大電流電子ビーム源を用いた方式はラマン型FELと呼ばれて区別されている。

我国においても、金沢大学¹⁰⁾、大阪大学レーザー核融合研究センター¹¹⁾、理化学研究所¹²⁾等において、ラマン型FELの研究が行われており、又電子技術総合研究所、分子科学研究所、日本大学原子力研究所⁵⁾、大阪大学産業科学研究所、等ではコンプトン型FELの発振を得ようとする計画が進行している。

本稿では1章に続いて2章でFELの原理の簡単な解説を行い、3章で現在までのFELの

* 理化学研究所(〒351-01 和光市広沢2-1)

* Riken, The Institute of Physical and Chemical Research(351-01, Wako-shi, Saitama, 351)

発振実験の代表的な例について紹介し、4章で最近の新しい傾向について述べる。

2. FELの発生の原理

この章では、FELの動作の原理の概略を述べる。

電磁気学でよく知られている様に電子が周波数 f_0 で上下に振動すると (Fig. 1(a) 参照), 周波数 f_0 の電磁波が主として振動方向と垂直な方向に放射される。次にこの電子が Fig. 1(b) に示されているように速度 v でピッチ λ_0 の周期磁界 (ウィグラー) 中を運動しながら, 運動方向と垂直に振動している場合を考える。電子のエネルギーを γ とし, 実験室系で観測する電磁波の周波数を f とする。 γ は相対論的係数と言われるものであり, 電子の加速エネルギーを E (MeV) とすると,

$$\gamma = \frac{E}{0.511} + 1 \quad (1)$$

電子の速度 v , 光の速度 c とすると

Fig.1 Dipole radiation from oscillating electron(a) and spontaneous emission in FEL(b).

となる。

この電子の放射する電磁波の周波数 f は, ドップラー効果により,

$$f = f_0 \frac{1}{1 - \frac{v}{c}} \quad (2)$$

となる。

ただし,

$$f_0 = \frac{v}{\lambda_0} \quad (3)$$

である。

(1), (2), (3)より $\gamma \gg 1$ の時, 即ち十分に大きなエネルギーを有する電子に関しては,

$$f \simeq 2 \gamma^2 f_0 \quad (4)$$

が得られる。

実験室系で観測する電磁波の波長を λ とすると

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{2 \gamma^2} \quad (5)$$

となる。

例えば $\lambda_0 \simeq 10 \text{ cm}$, $E = 100 \text{ MeV}$ ($\gamma \simeq 197$) とすると, $\lambda \simeq 1.29 \mu\text{m}$ となる。

以上, FELによって波長の短い自然放出光が得られる理由を説明した。レーザーとして発振する為にはこの他に, 誘導放出の機構を有する必要がある。即ち, 電子のエネルギーを, 自然放出光に移す機構が必要である。誘導放出の機構については紙面の都合上ここでは省略し, 結果のみを示し, 詳細な解説は他の解説書に譲る¹⁻⁴⁾。

Fig. 1の(b) に示される様に, γ のエネルギーを有する電子が周期長 λ_0 の周期磁界中を運動し, 周期の数を N とした場合, 自然放出光, 誘導吸収及び放出のスペクトルは Fig. 2 のようになる。この図に示されている様に, 自然放出光の

Fig.2 Spectra of spontaneous emission, stimulated emission and stimulated absorption in FEL.

スペクトルの中心波長を λ_s とすると $\lambda_s(1 + \frac{1}{4N})$ と、 $\lambda_s(1 - \frac{1}{4N})$ の所にそれぞれ誘導放出及び吸収のピークを持つことが理論的及び実験的に証明されている。自然放出光のスペクトル幅は $\sim \lambda_s/N$ であり、誘導放出及び吸収のそれと比較して十分広いので $\lambda_s(1 + \frac{1}{4N})$ の波長においても自然放出光が存在し、レーザー発振はこの波長で起こる。

電子ビームの電流を I 、ビームの半径を r とすると、一光路当りの小信号利得 α は $\Delta\gamma/\gamma \leq 1/8N$ の時近似的に

$$\alpha \approx 1 \times 10^{-3} \times \frac{I}{\pi r^2} \times N^3 \frac{K^2}{(1 + K^2)^{3/2}} \lambda_0^{1/2} \times \lambda_s^{3/2} \quad (7)$$

と表わされる^{2), 5)}。

但し、 K はウィグラー中における電子の蛇行運動の度合を表わすパラメーターであり、ウィグラー磁場の強さを B_0 [kG]、ウィグラーピッチを λ_0 [cm] とすると

$$K \approx 0.0934 \times B_0 \times \lambda_0 \quad (8)$$

となる^{1, 2)}。

3. 現在までの代表的な FEL の発振例

3.1 スタンフォード大学における初期の FEL 研究について

1976年にスタンフォード大学では、電子ライナックで発生した質の良い電子ビームをヘリカルウィグラーの中を通すことによって、 $10.6 \mu\text{m}$ において誘導放出の観測に成功した¹³⁾、これに

Fig.3 Experimental set up to measure the spontaneous emission and the gain at Stanford University¹³⁾

Fig.4 Measured spontaneous emission and gain spectra at Stanford University¹³⁾.

- a) Spontaneous power at $10.6 \mu\text{m}$ as a function of the electron energy.
- b) Stimulated emission and absorption as a function of the electron energy.

続いて1977年に $3.4\mu\text{m}$ 帯での発振に成功した⁷⁾。これらの成功がその後のFEL研究の活性化を促がした。

Fig. 3及びFig. 4に誘導放射測定のための実験装置の概略と実験結果を示す。ライナックで発生した電子ビームのエネルギー及び電流はそれぞれ24MeV及び70mA (ピーク値)であり,測定された利得は一光路当たり7%であった。Fig. 4から分かるように電子ビームのエネルギーの変化に対して誘導吸収及び放出が観測され理論的に

Fig. 5 Experimental set up of FEL at $3.4\mu\text{m}$ at Stanford University⁷⁾.

Fig. 6 Experimental results of FEL laser oscillation at $3.4\mu\text{m}$ at Stanford University⁷⁾.

- a) Output above the threshold.
b) Output below the threshold.

Table I Parameters of IR FEL at Stanford University.

実験装置	実験パラメーター	
電子ビーム	エネルギー	43.5 MeV
	エネルギー拡がり (半値全幅)	0.05%
	平均電流	$130\mu\text{A}$
	ピーク電流	2.6 A
ウィグラー	エミッタンス	0.06 mm mrad
	形 式	ヘリカル形
	ピッチ	3.2 cm
	ピッチ数	163
光共振器	全 長	5.2 m
	磁場強度	2.4 kG ($K \approx 0.72$)
光共振器	共振器長	12.7 m
	出力鏡透過率	1.5%

Table II Experimental results of IR FEL at Stanford University.

出力光特性	発振しきい値を越えた時	発振しきい値を越えていない時
発 振 波 長	$3.417\mu\text{m}$	$3.407\mu\text{m}$
スペクトル幅	$0.008\mu\text{m}$	$0.031\mu\text{m}$
平 均 出 力	0.36 W	10^{-8} W
ピーク出力	$7 \times 10^3\text{ W}$	10^{-4} W
偏 光	円偏光	円偏光

予測される結果と一致した。

Fig. 5とFig. 6に、 $3.4\mu\text{m}$ の発振実験に用いられた実験装置の概略と実験結果を示す。

Table I及びTable IIにこの時用いられた電子ビーム、ウィグラーの仕様と、FEL発振光の特性を示す。発振のしきい値を越えるとスペクトル幅が1/4になり出力のピークは 7×10^7 倍になっており、FELの発振が起っていることが分る。

3.2 パリ大学における可視域FELの発振例⁸⁾

1983年パリ大学のグループは電子蓄積リングを電子ビーム源として初めての可視域FELの発振に成功した。本実験ではウィグラーの一部

Table III Parameters of visible FEL at Paris University.

実験装置	実験パラメーター	
電子ビーム	エネルギー	160~166 MeV
	発振時の電流	16~100 mA
	エネルギー拡がり (rms)	$(0.9 \sim 1.3) \times 10^{-3}$
	角度拡がり (rms)	0.1~0.2 mrad
	寿命	60~90分
ウィグラー (TOK)	形式	垂直形
	ウィグラー (TOK) 長さ	1.3 m
	ウィグラー (TOK) ピッチ数	17 (内中央の3ピッチはドリフト部)
	利得増倍率	2~7倍 (TOK方式に改造しない時と比べて)
共振器	共振器長	5.5 m
	反射鏡の曲率半径	3 m
	最大のQ値を与える波長	6200~6800 Å
	6328 Å における平均反射率	99.965 %
	〃 共振器光路往復損失	7×10^{-4}
	出力鏡透過率	7×10^{-5}

Table IV Experimental results of visible FEL at Paris University.

発振波長	6400~6550 Å で可変
スペクトル幅	2 ~ 4 Å
平均出力	約 75 μ W
小信号利得 (TOK方式の時)	約 1×10^{-3} / パス
〃 (TOK方式を用いない時)	約 2×10^{-4} / パス
偏光方向	直線偏光

の磁場配列を修正して光学的クライストロン (Transverse Optical Klystronを略して TOKと記する)^{14), 15)}を構成することによって小信号利得2~7倍にした。これによって一光路利得が0.1%となり、発振のしきい値を超えることが出来た。Table III及びTable IVに、実験装置のパラメーター及び実験結果を示す。

現在では電流値を200 mAまで上げ、平均出力2 mW (ピーク値は20 W)、波長可変域5800~6500 Åとなっている。

3.3 UCSBにおける遠赤外域FELの発振例⁹⁾

UCSBの研究グループは、1984年バンディ

グラフを電子ビーム源として遠赤外域で準定常 (長パルス) 発振に成功している。彼らは電流密度を上げかつエネルギー利用効率を上げる目的でバンディグラフで発生した電子ビームをウィグラーを通過した後再びバンディグラフの高圧

Table V Parameters of FIR FEL at UCSB.

実験装置	実験パラメーター	
電子ビーム	エネルギー	3 MeV
	電流	2 A
	パルス幅	1 ~ 50 μ s
	くり返し速度	1 Hz
	電子ビーム回収率 (ウィグラー有り)	95%
	電子ビーム回収率 (ウィグラーなし)	99.5%
	加速電圧降下率	600 V/ μ s
ウィグラー	形式	垂直形
	全長	5.76 m
	ピッチ	3.6 cm
	ピッチ数	160
光共振器	共振器長	7.14 m
	反射鏡曲率	5 m (円筒ミラー使用)
	出力鏡透過率	11% (カップリングホール使用)
	共振器損失	12%

Table VI Experimental results of FIR FEL at UCSB.

発振波長	400 μm
スペクトル幅	$\leq 0.02 \mu\text{m}$ (瞬時値)
出力パワー	3 kW (1 パルス当りの平均)
パルス幅	1 ~ 50 μs
小信号利得	35%/パス

ターミナルに回収することを試み、95%の回収率を得ている。ウィグラーと相互作用させない場合回収率は99.5%に達した。電子ビームはウィグラーと相互作用することによりエネルギーを失う為、これに相当するポテンシャルをコレクターに印加することによって電子が再び高圧ターミナルまで到達することが出来るように設計されている。

Table V 及び Table VI に実験のパラメーター及び実験結果を示す。現在では、加速電圧が5.1 MeV まで上げられ発振波長は約150 μm 出力は20kWとなっている。

4. FEL 短波長化の新しい手法の研究開発状況

この章は筆者が、第7回FEL国際会議に出席して得た情報を基にして書く。

4.1 ガス封入形FELによる短化長化¹⁶⁾

スタンフォードの研究グループから発表された新しい方式のFELであり、低いエネルギーの電子ビームで短波長の発振を得るのに有効な方法とされている。

光共振器中に H_2 等のガスを封入することにより光の位相速度を真空中のそれより僅かに減少させ、電子のエネルギーをこの時の位相速度付近に合せる（電子の速度が光の位相速度より速くなる場合もある）ことにより、ガス封入形でない場合と比較して、低いエネルギー（速度が遅い）電子でも短波長の発振を得ることが出来るようになる。Fig. 7にこの概念図を示す。図中のBeの薄膜は加速器本体を真空中に保つ為のものである。発振波長 λ_s 、ウィグラーピッチ λ_0 、封入ガスの屈折率 n 、電子のエネルギー γ 、と

Fig.7 Schematic of gas filled FEL.

すると、

$$\frac{\lambda_s}{\lambda_w} = \left| \frac{1}{2\gamma^2} - (n-1) \right| \quad (9)$$

が成り立つ。一つの λ_s の値に対して二つの n の解が存在するのは電子の速度が光の位相速度より速くなることも可能であることに起因している。

封入ガスとしては例えば H_2 0.1 ~ 1 atm に5%程度の SF_6 を混合したものが検討されている。

計算例としては、エネルギー40 MeV ($\gamma \approx 79$) 電流15A (ピーク値)、 H_2 ガス1 atm 封入で $\lambda_s \approx 0.5 \mu\text{m}$ において $g_0 \approx 30\%/0.5\text{m}$ が示されており、ガスを封入しない場合、同じパラメーターで、 $\lambda_s \approx 2.7 \mu\text{m}$ 、 $g_0 \approx 30\%/m$ であることを考えると、ガス封入形FELの有効性が分る。

ガス封入形FELの問題点としては、ガスによる電子ビームの散乱、エネルギースペクトル幅 ($\Delta\gamma/\gamma$) の増大、発振出力光によるガスの絶縁破壊、ガスからのチェレンコフ光による電子のエネルギーの損失、ガスの温度上昇による屈折率の変化、等が挙げられている。これらのことからエネルギーの低い電子ビームを用いた場合は電子ビームとウィグラーの相互作用長を長くするのは困難であると思われるが、エネルギーの高い電子ビームを用いた場合は封入ガスの圧力を高くする必要はなくかつ電子のエネルギーが高いことにより散乱を受けにくいことを考えると、上記の問題点は解消される方向にあると考えられる。

現在までにガス封入形FELに関して行われている研究は、電子ビームの封入ガス中における伝播に関する実験及び計算のみであり、発振実験は行われていない。

小型の(エネルギーの低い)加速器で短い波長の発振を得ることが出来る可能性を有するガスマ封入形FELの今後の研究の展開に注目したいと思う。

4.2 高利得FELによる短波長化

FEL研究における大きな課題の一つに短波長化が有るが、一般のレーザーと同様にFELの場合も、式(7)から分るように波長が短くなるほど小信号利得が小さくなり発振が困難になる。

式(7)より分るように α を上げる為には、電流密度 $I/\pi r^2$ を増やす、 N を大きくする、 K を大きくする、等が考えられる。この中で最も効果的なのは N を増やすことであり($\alpha \propto N^3$)、次が $I/\pi r^2$ を大きくすることである($\alpha \propto I/\pi r^2$)。 $K \ll 1$ の時、 K を大きくすることは効果があるが($\alpha \propto K^2$)、 $K \sim 1$ では逆効果になって来る($\alpha \propto K^{-1}$)。 N を増やすとこれに伴って電子ビームのエネルギー拡がり $\Delta\gamma/\gamma$ にも小さくしていく必要があり、例えば $N \approx 100$ とすると $\Delta\gamma/\gamma \leq 1 \times 10^{-3}$ とする必要がある。

これまでに行われて来た電子蓄積リングを用いたFEL発振実験では、既存の蓄積リングを用いているのでポールピース間隔(ストレートセクション)が短かく長いウィグラー、即ち N の大きなウィグラーを設置できなかった。また電流値を特に大きくしようとする試みもなかった。しかし、現在パリ大学、スタンフォード大学、ローレンスバークレー研究所等で計画又は提案されているFEL用蓄積リングでは長いストレートセクションと大きな電流値を得ることが出来るように留意され設計又は建設が進められている。又、 N を増加させると電子ビームは質の良いもの($\Delta\gamma/\gamma$ が小さい)が必要になるが、この点にも留意して計画が進められている。この様にFELに使用することも考慮して建設された蓄積リングを用いることにより N 及び I を増やしかつ電子ビームの質を良くしたFELを“High Gain FEL”と呼んでいる。例えば、ローレンスバークレー研究所によってXUV領域($\sim 400\text{\AA}$)での発振を得ることを目標として

計画されているFELではウィグラー長が約20cmでウィグラーピッチ数 N が500~1000のものを考えている。

4.3 二段階(two stage)FELによる短波長化

この方式では二段階目のウィグラーとして強力な電磁波を用い、システムを簡略化するためにFELで発生した電磁波を二段目のウィグラーとして用いる方法が一般的に考えられている。これは二段階(two stage)FELと呼ばれ、先駆的な試みがNRLのグループによってなされているが¹⁷⁾、余りはっきりとした結果は得られていない。

現在UCSBのグループでは二段階FELによる近赤外域FELの発振を得る計画が進行している。この装置では、電子ビーム源として6 MeV、20Aのエネルギー回収形バンディグラフを用い一段目のウィグラーとしてはピッチ20cm、全長2m、磁場強度 $\sim 500\text{G}$ 、 $K \approx 1$ の常温連続運転のウィグラーを使用し、700 μm の遠赤外光を発生する。この遠赤外光を共振器のビームウエストで $1 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ に集光し、これを二段目のウィグラーとして用いることにより1 μm で15kWのFEL発振出力を取り出すとしている。二段目のウィグラーにおける一光路当りの小信号利得は7.2%であり、パリ大学での0.65 μm のFEL発振の場合の一光路当りの小信号利得が約0.1%であったことを考えると、UCSB方式の二段階FELによる短波長化に期待が持てる。UCSB方式で K 値が小さいにもかかわらず、大きな小信号利得を得ることが出来るのはウィグラーのピッチが短くなっているために、ピッチ数 N を大きくとれることに起因している(式(7)参照)。

4.4 マイクロウィグラーによるFELの短波長化

マイクロウィグラーとはピッチの短いウィグラーのことであり、従って全長も短かく小型のものになる。これを作るには、従来のウィグ

Fig. 8 Schematic of micro-wiggler.

ラーの様に1ピッチを4個の磁石片から構成せずに、細長い母材に周期磁界を磁化する方法が用いられている^{9),18)}。Fig. 8にUCSBにおいて試作されたマイクロウィグラーの概略図を示す。ウィグラーピッチ6mm, 磁極間距離3mmで600~800 Gの周期磁界が得られている。

マイクロウィグラーとバンディグラフを組合せたFELでは、単にウィグラーピッチが短くなっただけそれに比例して出力電磁波の波長が短くなるだけでなくその他に短波長化のための大きな利点がある。即ちウィグラーが小型化されたためにバンディグラフの高圧ターミナルの中に収納することが出来るのでバンディグラフの極性を変えることが出来、これによりバンディグラフの耐圧を倍以上に上げることが可能となる(UCSBでは6MVから30MVに上げることが出来るとしている)。従って波長は少くとも1/4以下にすることが出来る。さらに大きな利点は極性を変えることにより電子ビームのエネルギーの回収方法が容易になることである(depressed collector方式, Fig. 9参照)。

マイクロウィグラーを用いたUCSB方式のエネルギー回収型FELの概念図を、筆者の想像もまじえてFig. 9に示す。ウィグラーの中で失ったエネルギー分のみコレクターにバイアスを印加すれば原理的にはウィグラーを通過した電子ビームは全て回収される。全体として一つの容器内にまとまっており、実現すれば完成度の

Fig. 9 Compact FEL system using a micro-wiggler and a Vande graaff generator.

高い可変波長光源となると考えられる。

5. おわりに

一般のレーザーと同様にFELにおいても、大出力化、高効率化等が今後の課題になる。

FELは原理的にエネルギー蓄積形のレーザーではないのでQスイッチレーザー的な動作は出来ない。したがって大出力化のためには、電子ビームの電流を増加する必要がある。米国のローレンスリバモア国立研究所ではパルスパワー技術をRF加速器に応用した誘導型直線加速器(Induction Linac)の開発を以前から行っており、最新の装置(Advanced Test Accelerator又はATA)はエネルギー50MeV, 電流10kA, パルス幅50ns, くり返し速度1~10Hzの性能を有している¹⁹⁾。ATAの予備実験装置であるETE(Experimental Test Accelerator, 4.5MeV, 10kA, 30ns, 1Hz)²⁰⁾は既にFEL実験に用いられており、波長8.6mmのkWレベルのマイクロ波を約100MWまで増幅している²¹⁾。

本稿では述べなかったがここで述べたFEL研究以外にも数多くの研究が欧米を中心に行われている。それらの研究のほとんどは毎年米国

と米国以外の国で交代で行われている F E L 国際会議に発表されているので、さらに詳細な研究の内容を知るためには、その Proceedings を参考にされるのが最良と考える。現時点で入手可能なものは第6回会議までのものであり、1986年には第7回のものも発行されると思う。

参 考 文 献

- 1) 近藤：電子技術総合研究所調査報告第200号。
- 2) 近藤：応用物理，**49**(1980) 795。
- 3) 三間：日本物理学会誌，**37**(1982) 906。
- 4) 三間：レーザー研究，**5**(1977) 135。
- 5) 塚田：放射線，**11**(1985) 3。
- 6) 川崎：核融合研究，**54**(1985) 306。
- 7) D. A. G. Deacon, L. R. Elias, J. M. Mady, G. J. Ramian, H. A. Schwettman and T. I. Smith: Phys. Rev. Lett. **38** (1977) 892.
- 8) M. Billardon, P. Elleaume, J. M. Ortega, C. Bazin, M. Bargher, M. Velghe and Y. Petroff: Phys. Rev. Lett. **51** (1983) 1652.
- 9) Proceeding of the 7th International Free Electron Laser Conference (to be published).
- 10) 例えば，川崎他：昭和57年度科学研究費成果報告書，「自由電子レーザー(FEL)の実験的研究」。
- 11) 例えば，大東他：レーザー研究，**13**(1985) 432。
- 12) 例えば文献[9]参照。
- 13) L. R. Elias et al.: Phys. Rev. Lett. **36** (1976) 717.
- 14) N. A. Vinokurov: Proceeding of the Tenth International Conference on High Energy Particle Accelerators, Serpukhov **27** (1977) 454.
- 15) D. A. Deacon et al.: Appl. Phys. **B34** (1984) 207.
- 16) A. M. Fauchet et al.: IEEE J. Quantum Electron. **QE-20** (1984) 1332 又は文献[9]参照。
- 17) V. L. Granatstein, S. P. Schlesinger, M. Herndon, R. K. Parker and J. A. Pasour: Appl. Phys. Lett. **30** (1977) 384.
- 18) R. M. White: Appl. Phys. Lett. **46** (1985) 195.
- 19) 例えば C. A. Kapetanakis and Phillips Sprangle: Physics Today, February (1985) 50.
- 20) T. Fessenden et al.: Proceedings of the 4th International Topical Conference on High Power Electron and Ion Beam Research and Technology, (1981) 813.
- 21) 例えば文献[9]参照。