

1. はじめに

現在進行中の第4世代放射光施設である Energy Recovery Linac (ERL)計画[1]においては、ビームバンチ繰り返し 1.3GHz にて 100 fsec 程度のバンチ長を実現するために、1.3GHz モードロックレーザーで駆動されるフォトカソード DC 電子銃の開発が進められている。当該電子銃で最も困難が予想されるキーコンポーネントはレーザーの開発であり、その開発には多くの時間と予算が必要であると考えられる。そこで本稿では電子銃開発に必要なレーザー光発生のための、ERL 電子ビームで駆動される自由電子レーザー (FEL) を考察する。FEL では光共振器に用いられる反射鏡の限界である 200nm 程度までのレーザー光発生は大きな困難を伴うことなく可能であり、短波長のレーザー光を必要とする将来の金属カソード電子銃の開発にとって極めて有益であると考えられる。さらに将来像として、ERL 自身の電子銃を自分で駆動する FEL 光で動作させる、クローズドループ型 ERL システム (ブートストラップ ERL) を考えることができ、その可能性を追求してみることにする。

現在では、可視光から紫外光領域にかけての FEL 発振は多くの FEL 施設での実績があり、安定で信頼性の高いレーザー光の発生は日常的なものとなっている。例えば分子科学研究所の UVSOR における紫外光 (波長 210nm) から赤外光に至る範囲で動作可能な FEL 発振器においては、光強度の変動はピーク・ピークで 5%以下 (rms では 1%以下と推定される) であり、安定なレーザー光が得られている[2]。FEL は加速器で加速された電子ビームをアンジュレータの磁場中に通すことで、レーザー光を発生するものであるため、通常のレーザーとは違って ERL のビームバンチとの同期は簡単である。このような著しい特長を生かして、ERL 自身のビームで駆動する FEL から発生するレーザー光で、ERL 自身の電子銃を駆動する ERL システムを考えることができ、将来像としてブートストラップ ERL を考

えることができる。本稿のタイトルは、ERL でドライブされる FEL と、FEL でドライブされる ERL の二通りの意味を兼ねている。また FEL は本質的にハイパワーであるため、パワーに関しては全く不足する心配はない。逆に有り余るレーザーパワーのため、光共振器等の光学系の耐パワー性についての慎重な検討が必要である。

以下、2節及び3節では ERL 電子銃のフォトカソード照射に必要な、光共振器を用いた可視光 FEL の概略設計について、4節でブートストラップ ERL の概念設計について述べる。

2. FEL 発振器

図1に光共振器を用いた FEL 発振器を示す。直線偏光アンジュレータを想定し、水平方向に x 軸、垂直方向に y 軸、ビーム進行方向 (アンジュレータ軸方向) に z 軸をとると、軸上のアンジュレータ磁場は

$$\mathbf{B}_U = B_U \sin(2\pi z / \lambda_U) \cdot \mathbf{e}_y \quad (1)$$

と書ける。電子ビームは磁場 \mathbf{B}_U によって水平方向に蛇行運動 (アンジュレーション) しながら軸方向に進行し、水平方向に電場成分を持つ直線偏光電磁波 (光) と相互作用する。

よく知られているように、FEL の共鳴条件

$$\lambda_L = \frac{\lambda_U}{2\gamma_0^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (2)$$

が満たされているとき、アンジュレータ軸方向に沿って電磁波パワー P_L は図2のように成長する。

$$z < 2L_G \quad (3)$$

では電磁パワーはほとんど成長せず $z > 2L_G$ で指数関数的に成長し ($P_L = (P_0/9) \exp(z/L_G)$)、飽和に至る。ここで

$$K = e\lambda_U B_U / 2\pi mc^2 \quad (4)$$

はアンジュレータ磁場強度を表すパラメーターで、 K 値と呼ばれる。

$$L_G = \lambda_U / (2\sqrt{3}\pi\rho) \quad (5)$$

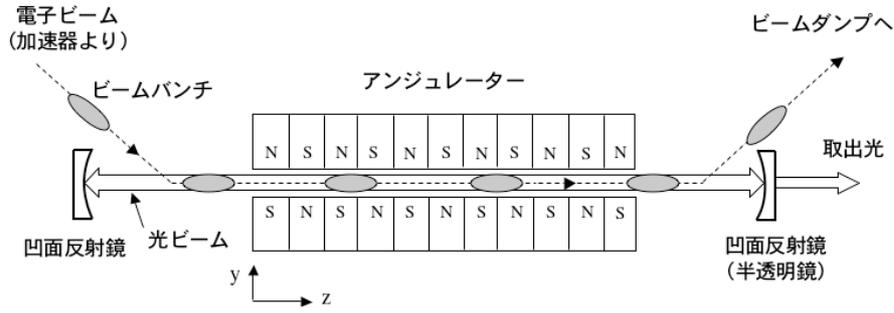


図1 FEL 発振器

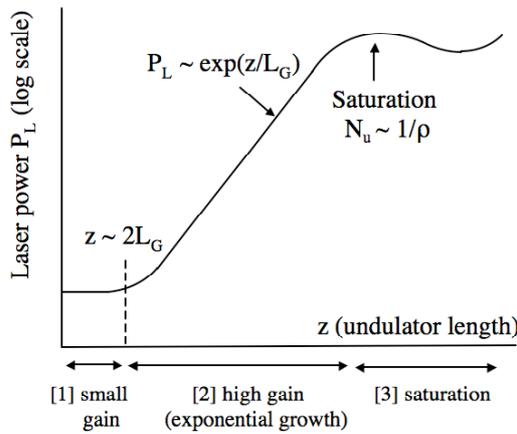


図2 アンジュレータ中の光パワーの成長

はゲイン長、

$$\rho = \frac{F^{1/3}}{\gamma} \left(\frac{A_{JJ} K}{2\sqrt{2} r_b k_U} \right)^{2/3} \left(\frac{I}{I_A} \right)^{1/3} \quad (6)$$

は FEL ピアスパラメーターまたは FEL ゲインパラメーターと呼ばれ、FEL の性質を決定する基本的パラメーターである。\$I\$ は電子ビームの瞬時電流であり近似的にバンチピーク電流 \$I = Q_b / \sqrt{2\pi} \sigma_t\$ で与えられるものとする。\$Q_b\$ はバンチ電荷、\$\sigma_t\$ はバンチ長 (rms) である。\$F\$ は電磁波ビームと電子ビームのオーバーラップファクター、\$r_b\$ はビーム半径、\$I_A = 17kA\$ は Alfvén 電流である。また、直線偏光アンジュレーターでは

$$A_{JJ} = J_0(\xi) - J_1(\xi), \quad \xi = \frac{(K/2)^2}{1 + K^2/2} \quad (7)$$

円偏光アンジュレーターでは \$A_{JJ} = 1\$ である。

(3)式の領域で動作する FEL をスモール・シグナルゲイン FEL と云い、電子ビームのエネルギー \$E = mc^2 \gamma\$ が (2)式を満たす共鳴エネルギー \$E_0 = mc^2 \gamma_0\$ よりわずかに大きい場合には、\$E\$ が減少し電磁波 (光) のエネルギーが増大することにより光の増幅が行われる。\$\lambda_U\$ は cm のオーダーであるので、電子ビームのエネルギー \$\gamma\$ を適当に選ぶことで、nm から cm に至る広い波長領域から望みの波長を選んで電磁波を増幅することができる。このような電子ビームと電磁波との干渉的相互作用がアンジュレーター中で維持されるためには、電子速度のバラツキ、即ち電子ビームのエネルギー広がり \$\sigma_E\$ 及び規格化ビームエミッタンス \$\varepsilon_n\$ が十分小さいことが要求される。

スモール・シグナルゲイン FEL では

$$\frac{\sigma_E}{E} \ll \frac{1}{2N_U}, \quad \varepsilon_n \ll \gamma \frac{\lambda}{4\pi} \quad (8)$$

であれば、電子ビームがアンジュレーターを一回通過するときの光強度に対する増幅度 (ワンパスゲイン) \$G(z) = \{P(z) - P(0)\} / P(0)\$ は

$$G = -32(\pi\rho N_U)^3 \frac{d}{d\theta} \left(\frac{\sin\theta}{\theta} \right)^2 \quad (9)$$

で与えられる[3]。デチューニング角 \$\theta\$ は

$$\theta = (\lambda_U N_U / 2) \Delta k \quad (10)$$

で与えられ、\$\Delta k\$ はデチューニング・パラメータ

$$\Delta k = k_U - \frac{\omega/c}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (11)$$

N_U はアンジュレーターの周期数である。(9)式の増幅度を図示すると図3のようになる。共鳴点 $\gamma = \gamma_0$ ($\Delta k = 0$) では増幅度はゼロ、 $\gamma < \gamma_0$ では増幅度は負、即ち光の強度が減少し電子ビームエネルギーが増大する。 $\gamma > \gamma_0$ で光強度が増幅され、増幅度は $\theta = 0.42\pi$ 即ち

$$\frac{\gamma - \gamma_0}{\gamma_0} = \frac{1}{4.76N_U} \quad (12)$$

のときに最大値

$$G_{\max} = 17.3 \times (\pi\rho N_U)^3 \quad (13)$$

となる。スモールゲイン領域で動作する FEL はゲインが小さいため、電磁波を一回だけアンジュレーターに通してもわずかしか増幅されないので、図1のようにアンジュレーターの前後に反射鏡を設置して光共振器を構成し、光を何回もアンジュレーター中を往復させて増幅することで、光強度を大きく増幅することができる。

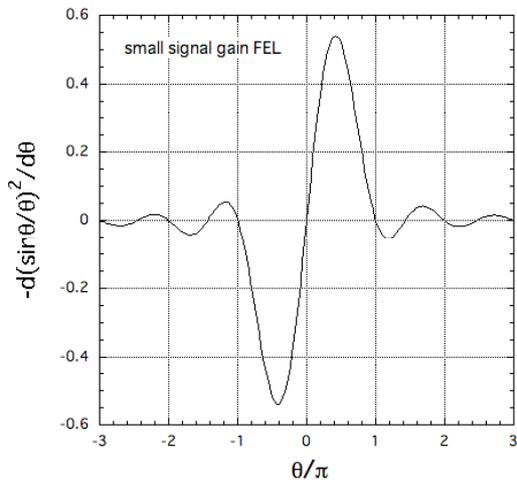


図3 FEL ゲインのデチューニングカーブ

電子ビームバンチのピーク電流が数アンペア程度のリニアックやストーレージリング等で、可視光から紫外線領域の光の増幅発振を行う FEL では、ワンパスゲインが%オーダーしかないために、光共振器を用いることになる。現在

稼働しているほとんどの FEL はこのタイプであり、光が共振器内を一往復するときには二枚の反射鏡で生ずる損失率より増幅度の方が大きければ、電子ビームがアンジュレータを通過する度に光が増幅され、電子ビームのショットノイズを種として FEL 発振が成長する。発振光のスペクトル幅は光共振器の Q 値で決定され、干渉性の良い光が得られる。電子ビームは短い長さバンチしているので (ERL では 1-3 ps 程度と想定されている)、増幅される光は電子ビームのバンチと同程度の長さのパルス状となる。このような光パルスが共振器内を往復してアンジュレーターを通過する度に、それと同期して電子ビームバンチがアンジュレーターを通過するようにアレンジすることで、同じ光パルスが共振器を往復する度に増幅されることになる。

(6)式、(13)式で分かるように FEL の増幅度 G は電子ビームの瞬時電流 I に比例するので、ビームバンチの時間構造がガウシアンとすると、発振はバンチのピーク近傍で行われる。従って発振する光パルスの時間幅は電子ビームのバンチ幅より狭くなる。ERL の電子銃に用いる場合にはこの性質を忘れてはならない。

いわゆる SASE-FEL は電子ビームがアンジュレーターを一回だけ通過する間に、電子ビームのショットノイズに基づくノイズ光を増幅可能な最大パワー (飽和パワーと云う) まで増幅するのに対して、FEL 発振器は繰り返し増幅することで飽和パワーにまで光強度を増幅するものである。FEL 発振器は広い意味での SASE に分類しても良いのであろう。光共振器から取り出される光パワーは、電子ビームエネルギーから光エネルギーへの変換効率を η として

$$P = \eta P_b \quad (14)$$

で与えられ、反射鏡損失及び光の取り出しを含めた共振器の全損失率を α とすると、 $\alpha = 0.21G_{\max}$ のときに取り出し効率が最大となる [4]。

$$\eta_{\max} = 0.29/N_U \quad (15)$$

3. ERL ビームで駆動する FEL 発振器

次に ERL の電子ビームで駆動される FEL 発振器を考える。ERL としては文献[1]のコンパクト ERL を想定し、表 1 のパラメータを仮定することにする。ERL の最大ビーム電流を 100mA、ビームバンチの繰り返しを 1.3GHz とすると、バンチ電荷は約 77pC (4.8×10^{10} e/bunch) である。電子銃のフォトカソードの量子効率を 1% と仮定すると、電子銃に必要なレーザー光量は 4.8×10^{10} photons/bunch であり、波長 750nm では 12nJ/bunch、平均 16W の強度が必要である。

電子ビーム	
バンチ繰り返し	1.3 GHz
エネルギー	60-200 MeV
エネルギー幅 $\Delta\gamma/\gamma$	$< 3 \times 10^{-4}$
規格化エミッタンス ϵ_n	0.1-1 mm·mr
バンチ長 σ_t	1-3 psec
フォトカソード RF 電子銃	
バンチ電荷 Q_b	77 pC
レーザー波長 λ	750 nm
レーザー強度 P_L	~12 nJ/pulse (平均 16W)
レーザー繰り返し	1.3 GHz

表 1 コンパクト ERL パラメーター

表 1 で電子ビームのエネルギーが 60-200MeV となっているのは、超伝導リニアックの段階的増強を想定しているためである。以下、表 1 のパラメータに基づいて、ERL 用電子銃のフォトカソード照射に必要な FEL を概略デザインする。

電子ビームのビームパワーは 100mA 時には 6-20MW と極めて大きいので、(14)、(15)式から予想される FEL 光のパワーは非常に大きいことが予想され、光強度を制限するためにアンジュレーター周期数は大きいことが望ましい。そこ

で全長 $L_U = 9m$ 、周期長 $\lambda_U = 45mm$ 、周期数 $N_U = 200$ のアンジュレーターを仮定することにする。

波長 $\lambda_L = 750nm$ のレーザー発振を考えると、 K 値及び必要なアンジュレーター磁場は図 4、ワンパスゲインは図 5 のようになり、89MeV 以上で発振可能である。以下、電子ビームのバンチ長は $\sigma_t = 3psec$ と仮定する。

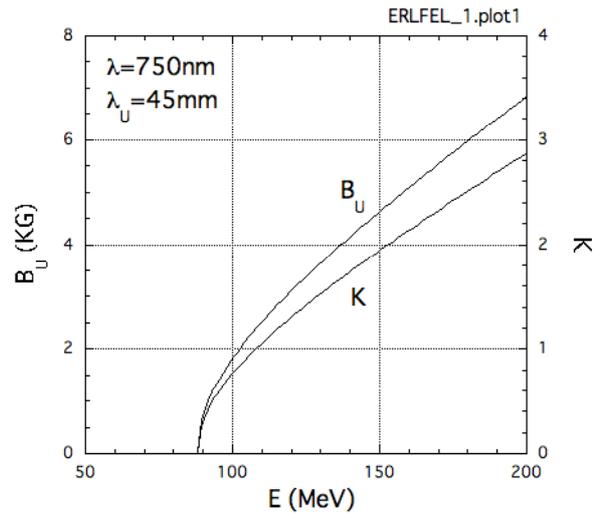


図 4 アンジュレーター磁場及び K 値のエネルギー依存性 ($\lambda_L = 750nm$)

160MeV 以上では必要なアンジュレーター磁場が 5kGauss 以上となり、永久磁石列を用いたアンジュレーターでは困難が予想されるので、150MeV 以上ではアンジュレーターの周期長 λ_U をもっと長くする必要があろう。

更に、ワンパスゲインが大きすぎるとスモールシグナルゲインの近似が成立しなくなるので、ワンパスゲインを制限するためピアスパラメータの計算においては、アンジュレーター中の電子ビーム半径は $r_b = 0.5mm$ 、レーザービームの断面積は電子ビームの断面積の 10 倍あるものとして、オーバーラップファクターは $F = 0.1$ と仮定した。このとき 100-200MeV の間のワンパスゲインは電子ビーム電流が 100mA では 46-67%、10mA では 4.6-6.7%となる。(9)式で分かるように、ワンパスゲインは電子ビームのバンチピーク電流

に比例する。光共振器からのレーザー光の取り出し効率を%オーダーとすると、安定な発振には10mA以上の電流が必要であろう。

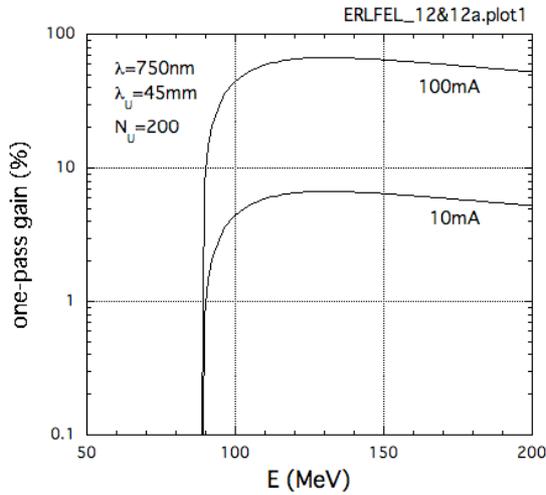


図5 FEL ワンパスゲイン (F=0.1)

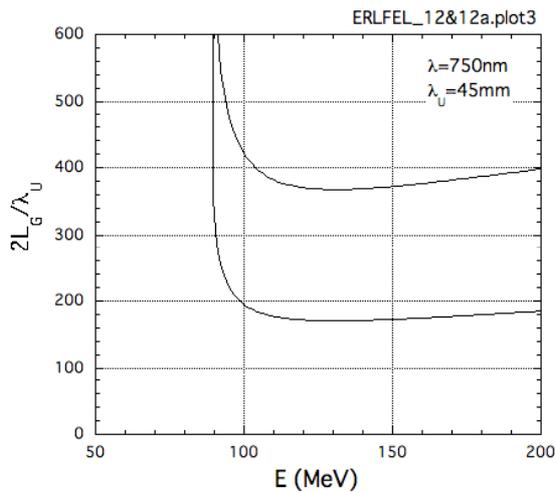


図6 スモール・シグナルゲイン領域

このような FEL は図2に示した動作領域のどの辺りで動作しているかを調べるために、(3)式で与えられるスモールゲイン領域の目安となる $2L_G/\lambda_U$ をプロットすると図6のようになる。 $N_U = 200$ のアンジュレータはビーム電流 10mA ではスモールゲイン領域に入っているが、100mA のときはスモールゲイン領域と指数関数的成長領域の境目くらいのところで動作することが分

かる。

図7は光共振器から取り出し得る最大のレーザーパワーである((15)式参照)。電子ビーム電流が10mAでは1.3-2.9kW、100mAでは13-29kWという非常に大きなパワーであり、共振器内部に蓄えられているレーザーパワーは100kW~1MWにもなるのではないかと想像される(注参照)。

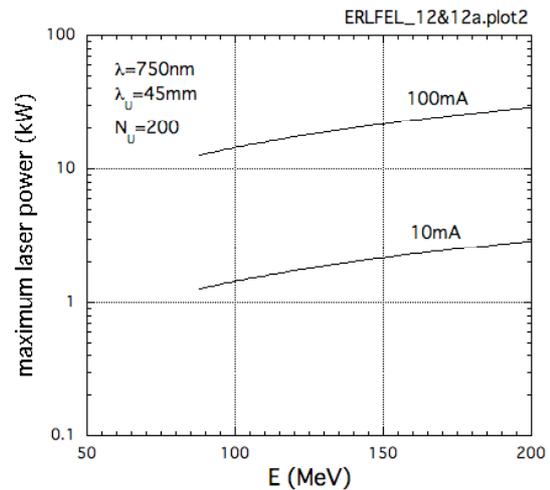


図7 最大取り出し可能レーザーパワー

したがって共振器を構成する反射鏡の発熱による損傷を避けるため吸収損失が極めて小さな反射鏡が必要となる。取り出しパワー及び共振器内パワーは反射鏡の損失及び取り出し効率によって大きく変わるので、上記のゲインの問題を含めて今後シミュレーションに基づいた詳細な検討が必要である。

注: LANL の波長 $\lambda = 10\mu\text{m}$ の FEL ではレーザー出力 6kW のとき共振器内のレーザーパワーは $P_{cav} = 90\text{kW}$ 、また最大パワーでは $\sim 500\text{kW}$ に達したと報告されている[5]。

図8は(4)式で与えられる電子ビームの規格化エミッタンス限界である。表1に示すように、ERLのビームは十分小さなエミッタンスが想定されているので、エミッタンスに関しては問題ないと考えて良いであろう。

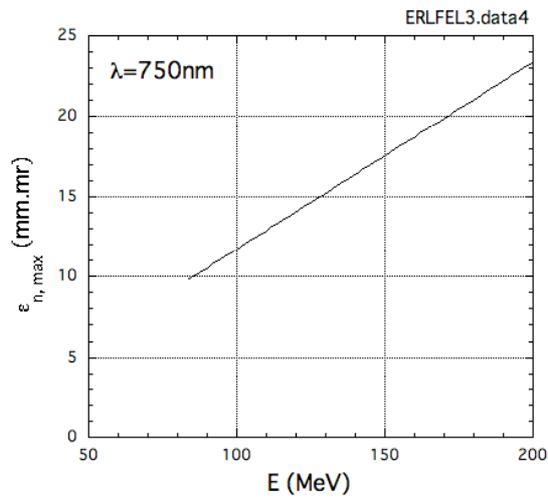


図8 エミッタンス限界

60MeV から発振させるためには、アンジュレーターの周期長を 20mm 以下に短縮する必要があるが、周期長が短いためにギャップが小さくなり、真空内装着型アンジュレータにしない限りは構造上困難が予想されるので、図9-10に示すように 89MeV 以下の領域は波長 1.5 μ m で発振させ、非線形結晶によるダブラーを用いて2倍波を発生するのが良いであろう。波長が長いためにワンパスゲインは更に大きく、100mA では指数関数的成長領域に入り込んだところで動作しており、スモール・シグナルゲイン近似はあまり良くないと考えられる(図11)。

以上のように ERL ビームによる波長 750nm の FEL は十分可能であり、フォトカソード電子銃の開発に必要なレーザーを実現できると考えられる。但しビーム電流 100mA では光共振器内に蓄えられるレーザーパワーが極めて大きくなると推測され、共振器内パワーと取り出し効率を含めた光共振器の損失率との関係をシミュレーションにより詳細に検討し、可能な限り共振器内パワーを低減するような設計が望まれる。更に光共振器の反射鏡の吸収損失による発熱問題の検討が必要である。例として表2に 100MeV の ERL ビームで駆動される FEL 発振器のパラメータ及び最大可能出力を示す。

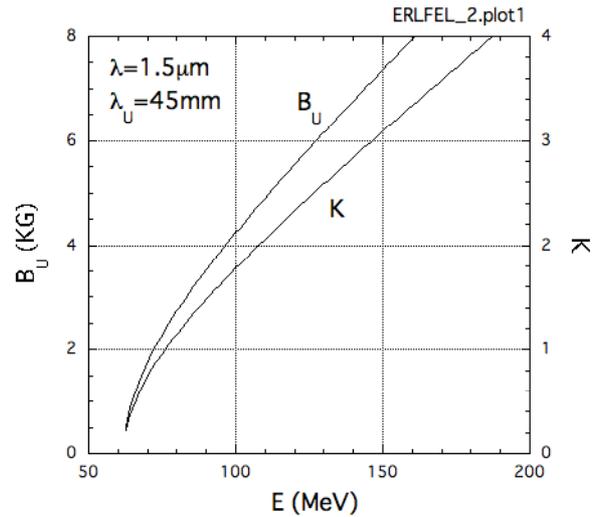


図9 K 値及び B_U ($\lambda_L = 1.50\mu\text{m}$)

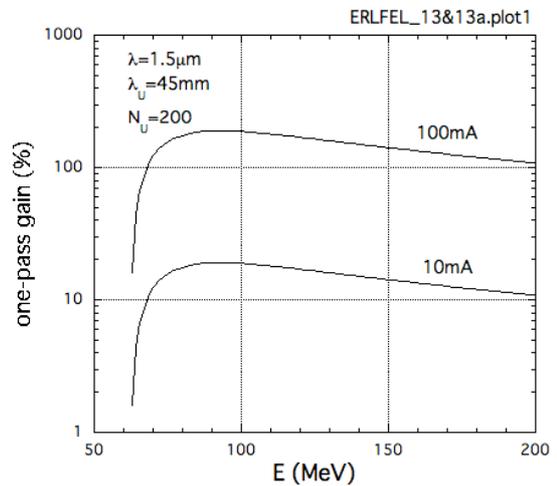


図10 ワンパスゲイン

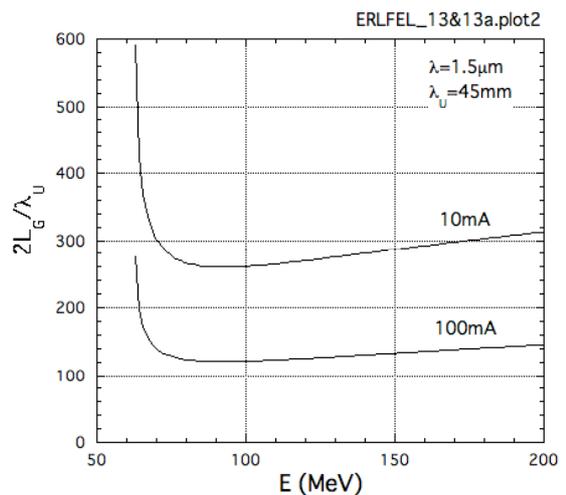


図11 スモール・シグナルゲイン領域

electron beam	
E	100 MeV
$\overline{I_b}$	10 / 100 mA
r_b	0.5 mm
undulator	
λ_U	45 mm
N_U	200
B_U	1.86 kG
F	0.1
laser	
λ	750 nm
G_{\max}	4.6%/46%
$\overline{P_L}$ (最大)	1.5 / 15 kW (1.15 / 11.5 $\mu\text{J}/\text{bunch}$)

表 2 100MeV における FEL 発振器

以上検討してきた FEL の利用としてまず考えられるのは、フォトカソード電子銃の開発に必要なレーザーとしての利用である。そこで現在 ERL 開発の第一段階として考えられている 60-120MeV のコンパクト ERL に FEL を組み込むと

したら、図 1 2 に示すようなものになるであろう。直線部の入口でビームを FEL アンジュレータに振り分け、直線部終端のアーカ部にビームを戻す。通常は直線部にビームを通して挿入光源からの光を物理実験に使用し、電子銃開発のための実験時には FEL アンジュレータにビームを通して、750nm ないしは 1500nm の FEL 光を電子銃開発スタンドへ導く。導かれた光は適宜光減衰器にて減衰させるとともに、光ファイバー等の分散を利用した光パルス幅の伸張または圧縮を行い、フォトカソードに最適な形状及び強度に調整された光パルスを利用することになる。また 1500nm 光の場合には、2 倍波の 750nm を発生させるため非線形結晶を用いた 2 通倍器を使用する。

FEL のレーザー強度は 1-30kW と非常に大きいので、通倍しても十分なパワーが得られる。そこで、600nm または 800nm の波長で発振する FEL からのレーザー光を、非線形結晶を用いて 3 通倍または 4 通倍して 200nm のレーザーを作ること、金属フォトカソードの開発に利用することができる。

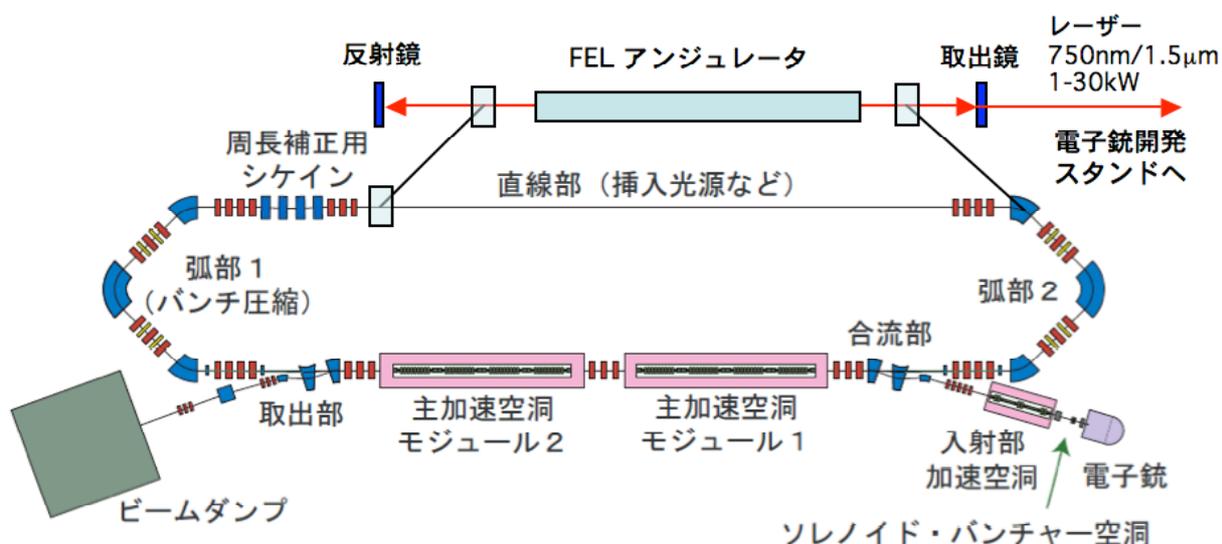


図 1 2 コンパクト ERL で駆動する FEL 発振器

4. ブートストラップ ERL

以上のような FEL で発生するレーザービームは ERL ビームに完全に同期しているため、この光を用いて ERL 自身のフォトカソード電子銃を駆動することが考えられる。自分で自分自身を駆動する、いわば「ブートストラップ ERL」である。その概念図を 210MeV の ERL の場合について図 1 3 に示す。入射器から 10MeV の電子ビームを 200MeV の超伝導リニアックに入射するものとする。リニアックを 120MeV と 80MeV に分け、その間に加速ビームと減速ビームを分離するためのビームセパレータを挿入する。

120MeV リニアックで 130MeV に加速されたビームは次段の 80MeV リニアックに入射され、210MeV に加速されてアーク部、直線部、アーク部と周回する。その後周回ビームは 120MeV リニアックの減速位相に再入射され 90MeV に減速された後、ビームセパレータで 130MeV の入射ビームと分けられて FEL アンジュレータに導かれる。90MeV の減速ビームにより FEL が駆動されて ERL のビームバンチと同じ時間構造の光パルスが発生する。このようにして発生した FEL

光を ERL 自身の電子銃に導きフォトカソードを照射して ERL の電子ビームを発生する。このようなクローズドループ型の ERL は電子回路における発振器と同じような動作をするものと予想される。FEL 光の強度は極めて大きいので、このままでは電子ビームは急激に増大しフォトカソードを破壊してしまうため、入射器から周回部に入射する直前にビーム強度モニタにて電子ビームの強度を検出し、その信号により光減衰器を制御して光強度をコントロールする必要がある。これは電子回路の発振器において、振幅制限用の振幅減衰器またはリミッターが必要であることと同じである。さらに FEL で発生する光パルスの時間幅は電子ビームバンチの幅より狭いので、何もしないとビームバンチ幅が勝手にどんどん短くなっていき、それに伴って FEL のゲインが異常に上昇し、ついには光共振器を破壊してしまう恐れがある。そこでパルス幅を ERL に最適な幅に伸張するために光ファイバーの分散特性を利用したパルス幅伸張器が必要である（例えば文献[1]の第 3 章においては、フォトカソードの初期ビーム分布の時間幅は 17ps(rms) あるいは全幅 32ps と仮定されている）。

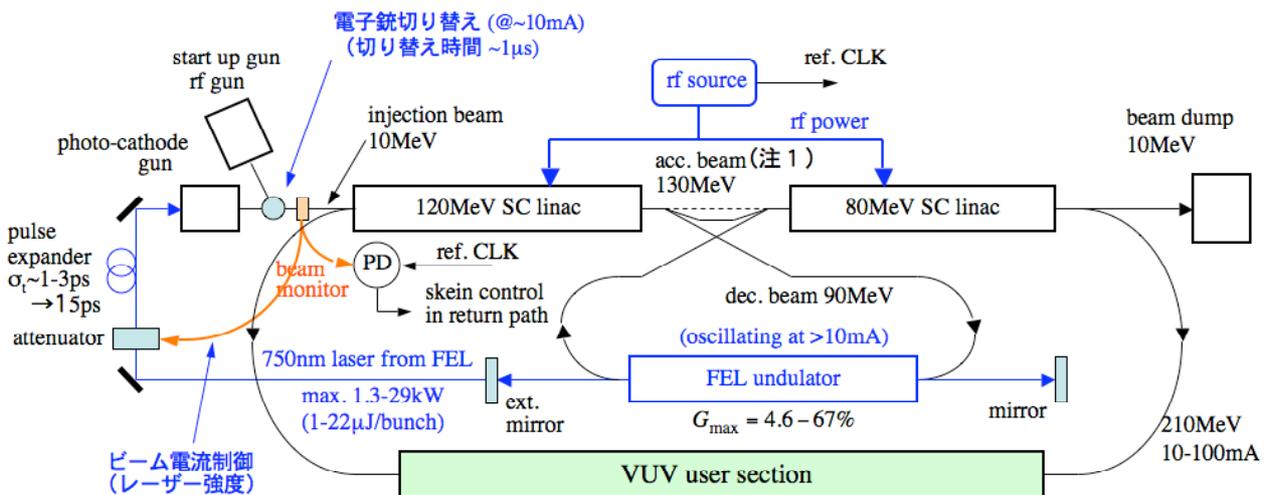


図 1 3 210MeV ブートストラップ ERL

更に重要なことはリニアックの加速高周波と FEL 光の位相同期である。そのためには電子ビームのバンチモニタにてビームと高周波の相対位相差を検出し、位相情報により ERL の周長補正用シケインを制御する、あるいは FEL 光の光路長を制御することが必要である。

このようなブートストラップ ERL は自分自身で起動することはできないので、起動するための電子銃が必要である。起動用電子銃としてはエミッタンスに対する条件は厳しくないの、通常の rf 電子銃で可能であろう。FEL が安定に発振できる 10mA 程度のビーム強度になるまで、rf 電子銃で ERL/FEL を駆動してフォトカソード電子銃を動作させ、同じ強度の電子ビームを発生させる。その後ビームが ERL を周回する時間以内で、入射器に入射するビームをフォトカソード電子銃に切り替えることが必要である。

5. おわりに

ERL 用のフォトカソード電子銃の開発に利用できる、ERL ビームで駆動する波長 750nm の FEL の可能性を考察した。FEL 発振は原理的に可能であるが、大きなビームパワーのため発生するレーザーパワーも kW 以上という極めて大きくなるものと推定される。このことは光共振器に蓄えられるレーザーパワーが極端に大きいことを表しており、共振器が現実的か否かシミュレーションに基づいた慎重な検討が必要である。また、ブートストラップ ERL についてはまだアイデア段階であり、詳細な検討はなされていない。特に 0.1ps オーダーのバンチ幅ではバンチピーク電流が極めて大きくなるため、FEL のワンパスゲインが非常におおきくなり、スモールシグナルゲインの近似が適用できなくなる。シミュレーションによる詳細な考察が必要であろう。

参考文献

- [1] 羽島良一他編, 「コンパクト ERL の設計研究」, KEK Report 2007-7.
- [2] S. Koda M. Hosaka, J. Yamazaki, M. Katoh and H. Hama, NIM A475(2001)211.
- [3] C. W. Roberson and P. Sprangle, Phys. Fluids B1(1989)3.
平松成範, 「自由電子レーザー基礎論」, OHO98 高エネルギー加速器セミナー, 1998 年, p.I-1.
- [4] E. L. Salidin, E. A. Schneidmiller and M. V. Yurkov, The Physics of Free Electron Lasers, Springer, 2000.
- [5] B. E. Newnam et al., IEEE Journal of Quantum Electronics, QE-21(1985)867.