

Studies about Free Electron Laser Using Induction Linac

K. Imasaki, T. Akiba, K. Mima, S. Kuruma*, N. Ohigashi, K. Tsunawaki,
S. Nakai and C. Yamanaka*

Institute of Laser Engineering, Osaka University

*Institute for Laser Technology

ABSTRACT

We have studied about Free Electron Lasers using induction Linac. The output of induction linac is 6 MeV · 3 KA with 100 ns pulse length. The FEL wavelength is 496 μm using planar pure permanent magnet wiggler of 6 cm pitch. The output is expect to achieve GW level with 100 kW CH F oscillator injection. The experiments are underway.

誘導加速器を用いた自由電子レーザー

1. はじめに

自由電子と周期磁場との相互作用による自由電子レーザー (FEL) は、その性質上、波長が完全に可変であり、励起電子ビームからのエネルギー変換率が高いという極めてすぐれた特性を持っている。特に誘導加速器は、パルスパワー技術の向上により、高エネルギー大電流電子ビーム発生が可能となり、これを用いた自由電子レーザーは、大出力高効率で低コストの広範囲波長コヒーレント光源として期待できる。このような観点に立ち、大阪大学レーザー核融合研究センターでは従来より開発を行ってきたパルスパワー技術による誘導加速器システムを開発し、大出力FELの開発を推進している。

2. 自由電子レーザー用誘導加速システムの開発

高出力FELを得るためには、電子ビームは、高エネルギー、大電流で、且つ速度ベクトルのそろった良質のものが要求される。そこで、高電圧で、KA以上の大電流電子ビームを発生する方式として、パルスパワー装置に誘導加速機構を取付ける加速器システムの開発を行ってきた。¹⁾

加速器システムは、大別して電源部および、ビーム部より成る。電源部は初期エネルギー蓄積部、パルス成形-分配部、誘導電圧重畳部より成る。一方ビーム部はダイオード部、誘導ビーム加速部、伝送部より成っている。また自由電子レーザー部はテーバーウィグラーより成っている。第1表に各部諸元を示す。現在システムの設計・製作が終了し、実験が行われている。

2. 1 電源部

初期エネルギー蓄積部は1/10 Hzのマルクス発生器より成っている。このエネルギーをパルス成形部に移し、分布定数路長で決まるパルス幅に成形する。パルス幅は100 nsである。パルス成形部と初期エネルギー蓄積部の間には、中間エネルギー蓄積体が必要になる。これは、低インダクタンスコンデンサーとして働き、パルス成形部を高速充電し、パルス成形多重スイッチを動作させる。この成形パルスを分配部で40本の50 Ω ケーブルへと分配し、誘導電圧発生キャビティへと導く。パルス成形部より分配され、キャビティへ印加された電圧波はキャビティの段数分だけ重畳される。入力エネルギーの70~90%がビームに変換される。ダイオードインピーダンス中の時間変化による電圧変動率は半値幅50 nsの間で約 $\pm 10\%$ 程度であった。FEL発振のためにはビームエネルギー変動は極めて有害であるため、バイパス負荷を挿入した。電圧変動率はパルス幅70 nsの間で $\pm 3\%$ 程度となり、エネルギー変動率が改善された。

2. 2 ビーム部

ビーム発生部は、誘導電圧重畳部内部にあり、重畳電圧をダイオードに印加する形式である。カソードとしては、ベルベットを主として用いている。この特徴は、ビーム電子の立ち上がり早いこと、容易に大電流密度が取れることである。ダイオードからのビームの伝送は、ソレノイド磁場によるブリルアン流方式を行った。このためカソード表面での磁場を0とするため、補償フィルを設け正準運動量を0としている。

ソレノイド磁場により伝送されたビーム (1 cm径) は、四重極マグネットにより収束されウィグラー磁場へ打ち込まれる。FEL用として、ビームをより高品質化することが必要である。このためエミッタンスセレクターを2ヶ所設ける。まず第1セレクターは、ソレノイド内での伝送ビーム径と対応したチューブ内を2m伝送することにより、エミッタンスの大きな成分を除く。第2セレクターは、四重極磁場の収束点に、アパーチャーを設ける。これにより $\varepsilon_n < 0.1$ 程度になりFELの要求を満足させる値となる。

ビーム伝送中に空間インピーダンスの不整合部分を何回も通過する。このためビーム破壊不安定 (BBU) が誘起される。筆者らの場合成長率 Γ 5程度と考えられ、初期動揺が 10^{-4} cm程度であれば、キャビティ内でのシフト量は0.1mmでビーム径に比して充分小さく、問題がない。今後ビームエネルギーを増大 (=多段化) させた場合、20MeV程度でシフト量はmmのオーダーになるので、そのときは B_0 を増大するか、 $Z_0 = \omega_0$ 積の小さいキャビティ設計を行うことが必要となる。

2.3 自由電子レーザー部

ウィグラー磁場は、電子ビームから自由電子レーザーへのエネルギー変換効率を上げるためにテーパ化されている。磁場は4.0KGから1.2KGへと可変である。これは磁極間隙を変化させることにより得られる。磁場は永久磁石 (ネオマックス) を用い、磁石幅は12.6cm、表面磁場は ~ 10 KGとなっている。磁石自体の強度の精度は0.1%、位置の精度はビーム軸方向で0.5%となっている。磁場周期は6cmで30ピッチである。ビーム入射口にキッカーが付置されている。ビーム径は3mmで、これを保持するため、四重極磁場がウィグラー磁場周りに配置されている。

自由電子レーザーピーク出力は1GW級となることがシミュレーションより予想されている。またビームのパラメータは6MeV、800A、パルス幅80nsである。増幅源レーザーとしてD₂Oレーザー (385 μ m)、もしくはCH₂Fレーザー (496 μ m) を用いる。これらは烈光Ⅷ号CO₂レーザーのモジュールにより光励起される。

3. FEL実験

3.1 FEL出力実験

FEL実験が第1期部分4段を用いて行われた。現在のビーム出力を第1図a) に示す。電子ビーム電流の立ち上がり一致してFEL出力が検出されている。現在ピーク付近での出力は ~ 5 MWであり、予測値と同程度である。

FELスペクトルを第1図b) に示す。出力ピークは240GHz付近であり、波長は1.3mmとなっている。これは、ビームエネルギー1.6MeV、ウィグラーピッチ30mmにより予想される値と一致している。

3.2 分布フィードバック (DFB) 型FEL

DFB機構を用い、スペクトルの先鋭化、高輝度化を計った。またこの方式は、長波長域でのサイドバンド不安定性の抑制に効くと考えられている。円偏波モードとの整合性を取るため、ラセン状になっている。この管内での進行モードと後退モードとの結合方程式よりDFBシステムでの発振条件は、

$$\frac{S - \left(\frac{\alpha}{2} - i\Delta\beta\right)}{S + \left(\frac{\alpha}{2} - i\Delta\beta\right)} e^{2SL} = 1 \quad (1)$$

となる。ここで、 α は利得、 $\Delta\beta = \beta - \beta_0 = \beta - 2\pi/S$ で基準モードからのずれを示す。 $S = \sqrt{K - (\alpha - i\Delta\beta)^2}$ でKは伝播定数である。LはDFBの長さを示す。この式は特異点で解を持つ。また発振周波数は

$$\omega_m = \omega_0 + (\text{sgn } m) \cdot \frac{c^2 \beta_0 |K|}{2\omega_0} \sqrt{1 + \left(\frac{m\pi}{KL}\right)^2} \quad (2)$$

で $m = \pm 1, \dots$ となる。

実験により得られた出力波形を第2(a)図に示す。DFBのない場合 (第1(a)図) との波形に大きな差異があることが認められる。これは、第1式より求められた結果が特異点状になることにより説明ができる。即ち、電圧の上昇に伴い、また下降に伴い、この発振点を横切るために出力が二重ピークになる。第2(b)図に出力にスペクトルを示す。1.05mm付近および1.35mm付近でDFBがある場合、スペクトルエネルギーの集中が起こっている。第1(b)図に比べると約5倍まで高輝度化が達成できている。これらのピークは、第2式の $m = \pm 1$ に対応している。このことにより実験値は、DFBの一般理論とよく一致し、自由電子レーザーに適應されることが判った。

4. まとめ

誘導加速器を用いて、大出力自由電子レーザーの研究を行っている。誘導加速システムは完成

した。ビームはソレノイド磁場・四重極磁場により伝送され、永久磁石を用いたウィグラー磁場に3mmの径で入射される。出力としてはGW級の発生が可能であり、そのとき波長は $\sim 500 \mu\text{m}$ 付近である。加速システムの一部を用いて、出力実験、スペクトル狭化実験が行われ、出力5MWが得られDFBによりASE出力輝度はDFBのない場合に比して5倍に増加した。

Marx発振器 → ISC → PFL → DL → Cable →

60kJ, 1.2MV, 60nF 1.2MV 1.0MV, 80ns 0.5MV, 80ns 50Ω
1~1/10Hz 1.25Ω 1.25Ω 40outlets

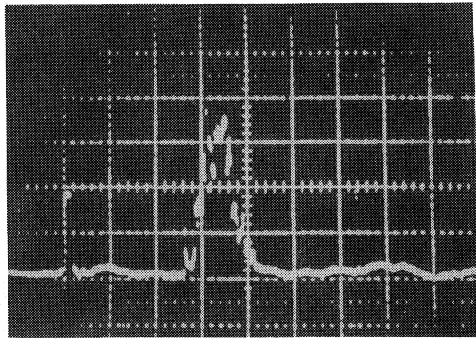
電圧重畳部(8段) → ダイオード → 加速部(4段) → ソレノイド伝送部 →

500kV/段, 40KA 4MV, 10KA 2MV, 10KA 6MeV, 10KA

エミッタンスセクターI → 四重極磁場 → エミッタンスセクターII → ウィグラー磁場

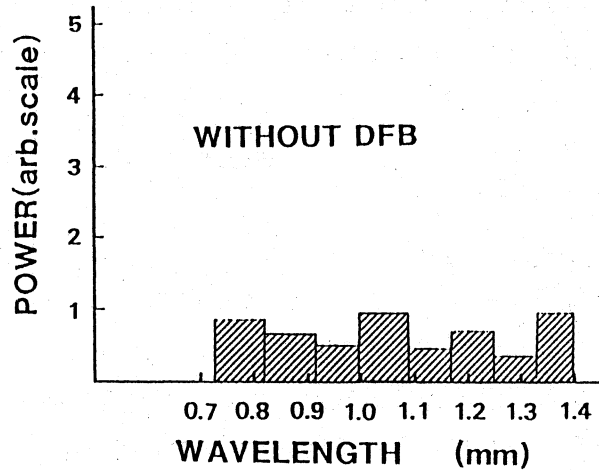
6MeV, 3KA ビーム径 3mm 6MeV, 1KA 1~4KG, 6cmビッチ

第1表 システム各部諸元

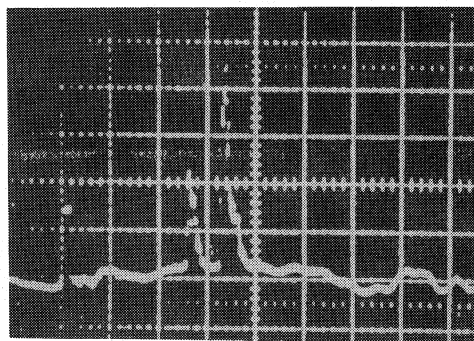


出力波形
(50 ns / DIV)

第1図 a) FEL出力波形

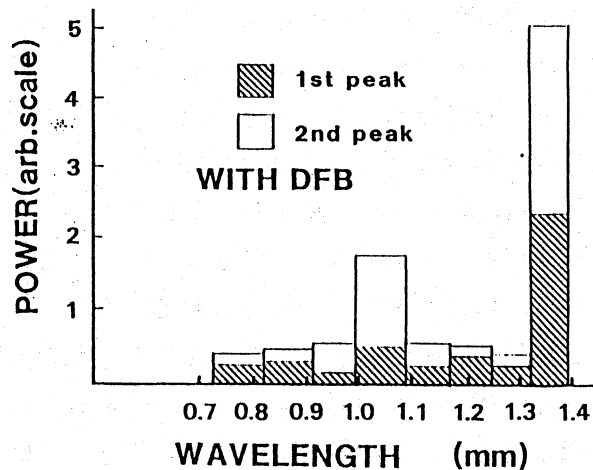


b) FELスペクトル



出力波形
(50 ns / DIV)

第2図 a) DFBFEL出力波形



b) DFBFELスペクトル