種光を用いた短波長自由電子レーザーの研究

今崎 一夫*, 中尾 直也, 後藤 道夫**, 文 雅司*, 大東 延久***, 綱脇 恵章****,
三間 罔興*****, 中井 貞雄, 山中 千代衛*
大阪大学 工学部 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘1-1)
*(財)レーザー技術総合研究所 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-6)
**大阪大学 接合科学研究所 (〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘11-1)
***関西大学 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-5-35)
****大阪産業大学 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内3-1-1)
*****大阪大学 レーザー核融合研究センター (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-6)

Study of Short Wavelength Free Electron Laser with a Seed X-ray

Kazuo IMASAKI,* Naoya NAKAO, Michio GOTO,** Ahsa MOON,* Nobuhisa OHIGASHI,***
Yoshiaki TSUNAWAKI,**** Kunioki MIMA,***** Sadao NAKAI, and Chiyoe YAMANAKA*
Osaka University, 1-1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871
**Institute for Laser Technology, 2-6 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871*
***Joining and Welding Research Institute, Osaka University, 11-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047*
****Kansai University, 3-5-35 Yamate-cho, Suita, Osaka 564-8680*
*****Osaka Sangyo University, 3-1-1 Nakagaito, Daito, Osaka 574-8530*
******Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2-6 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871*

(Received November 11, 1999)

On the development of short wavelength Free Electron Lasers, there is a issue of the extremely large system. It is caused by high energy accelerator and a long wiggler. In order to solve this, we propose a system utilizing a microwiggler and seeding X-rays. Microwiggler makes it possible to lase at the wavelength of vacuum ultraviolet to soft X-ray with low energy electron beam. With seeding X-ray, quick start-up and thus short wiggler length are expected. We examined the validity of seeding X-ray using computer simulation. As a result, when seeding X-ray of 10 kW average power is supplied, it was shown that wiggler length for the radiation saturation was shortened by 60 %. We are going to use Laser-produced Plasma X-ray (LPX) for the seeding X-ray source. The technique of using an ellipsoid mirror to improve coupling efficiency of LPX to seeding X-ray is also discussed.

Key Words: SASE, Micro-wiggler, Seed X-ray, LPX

1. はじめに

X線のような短波長域の自由電子レーザー (Free Electron Laser, FEL) では, 光共振器を構成できる高反射率, 高耐力ミラーが存在しないため, 共振器無しで発振を行う自己増幅自然放射光 (Self Amplified Spontaneous Emission, SASE) 型のFELが検討されている¹⁻³⁾. しかし発振波長の短波長化にともない, 高い電子ビームエネルギーが要求されるため, 加速器および放射線遮蔽施設が大規模なものになるという問題が生じてくる. さらに, SASE FELの発振機構から, 非常に長尺のウィグラーが必要となり, このことも装置開発の障害となっている. これらの問題を除くために我々は電子ビームと同期した種光をマイクロウィグラーに入射し, それを増幅させることを提案する.

マイクロウィグラーを用いた場合, 数百MeVの電子ビー

ムで真空紫外から軟X線領域の発振が可能となる. すなわち, 要求される波長域に対する電子ビームエネルギーを低く抑えることが出来るため, 加速器の規模が比較的小さく済む. また, 種光を用いて放射光の立ち上がりを早くすることで, ウィグラー長の短縮化が見込め, これにより装置開発が容易になる. 現在, 著者らは, 自由電子レーザー研究所 (Free Electron Laser Institute, FELI) において, 150MeVのライナックを用いたこのような方式の短波長FELの研究を行っている.

2. SASEシミュレーション

種光を用いたSASE FELの増幅特性を解析するため, シミュレーションを行った. SASEでは放射光が電子ビームに強く捕捉されるような強い相互作用を起こすため, 従来

の様な共振器に依存した展開法では非常に高次のモードまで計算する必要がある。そのためこのシミュレーションでは、電子ビーム依存展開 (Source Dependence Expansion, SDE) 法を用いた。SDE法は、放射光が電子ビームに強くトラップされて波面が歪んだ場合でも低次の横モードの重ね合わせで電磁波強度分布を記述できるので、計算機シミュレーションとして非常に適している⁴⁾。今回、このSDE法によって記述した放射光の振幅の式と、その位相に含まれる各粒子に対する運動方程式を連立させて解くことによって、放射光と電子ビームとの空間発展を調べた。

Table 1はシミュレーションパラメータである。本報告では、電子ビームエネルギーが150MeV, 330MeVの二つの場合の結果を示す。150MeVというのはFELIの電子ビームエネルギーである。使用するウィグラーは周期長10mmのヘリカルマイクロウィグラー⁵⁾であり、このときの発振波長は64.9nmと計算される。また、FELIの加速器は電子ビームのパルス持続時間を短縮することで約300MeVまでエネルギーを上げることが出来る。電子ビームエネルギー330MeVのとき波長は13.5nmとなるが、この波長は軟X線多層膜反射ミラーの中で最も高い反射率が得られ、産業応用にも期待されている波長である⁶⁾。また、 P_0 は放射光の初期値である。SDE法は増幅の計算をするので初期値の設定が必要となる。この初期値には、周波数揺らぎ、コヒーレンスのパラメータは含まれていない。また、 $P_0 = 1\text{W}$ が種X線を使用していない、自然放射光ノイズからの発振の場合に相当する。

シミュレーションの結果をFig.1, 2に示す。Fig.1はビームエネルギー150MeV、発振波長64.9nmの場合である。(a)は放射光の成長の様子を、(b)は放射光の強度が1/eに減衰する半径を表している。(a)に示されるように、種X線を用いていない場合($P_0 = 1\text{W}$)、放射光は9mの位置で飽和している。一方、10kWの種X線を打ち込んだ場合、飽和までのウィグラー距離がおよそ3mにまで短縮されている。また(a), (b)より、放射光の飽和と径の発散の位置が対応していることが分かる。放射光が飽和するときには電子ビームが大きく密度変調を受けており、空間分布において極端な粗密が生じる。そのため電子ビームのトラップ効果が弱くなりガイディング条件が崩れ、放射光は発散していくものと考えられる。6m付近に見られる放射光の一時的な減衰は、電子ビームのベータトロン振動によるものと考え

Table 1 The parameters for SASE simulation by SDE method.

electron beam	
E_b	150, 330 MeV
I_b	200 A
r_b	100 μm
wiggler (helical)	
λ_w	10 mm
B_w	0.38 T
N_w	1000, 3000
radiation	
λ_s	64.9, 13.5 nm
r_s	120 μm
P_0	1-10 kW

Fig.1 The result of the simulation by SDE-method. (a) The growth of SASE. (b) The 1/e radius of the radiation. The radiation wavelength is 64.9 nm.

られる。SASE FELでは、電子ビームに放射光がトラップされながら相互作用が続いて行くが、電子ビームのベータトロン振動によってその効果が一時的に弱くなると考えられる。また、 $P_0 = 10\text{kW}$ の種X線を入射したときの放射光径が激しく振動しているのは、基本モードの振幅強度に対して高次モードが支配的になるためである。

Fig.2はビームエネルギー330MeVの場合で、発振波長は13.5nmである。種X線を用いなかった場合、放射光はゆっくりと成長し、 $z = 20\text{m}$ において 10^5W で成長が止まる。放射光が18m付近から発散しているため、これ以上の成長は見込めない。一方、種X線を用いた場合、100W, 10kWともに、 $10^7 \sim 10^8\text{W}$ で飽和に達している。また、10kWを入射した場合、飽和距離は8mにまで短縮されており、100Wの種光を入射したときに比べて10m程度ウィグラー距離の短縮が見込まれる。

これらの結果から、種X線を入射することによって飽和までの距離が短縮されることがシミュレーションによって示された。これにより、ウィグラーの短縮化が期待できる。また、入射する種X線は、ベータトロン振動による影響が出るよりも早く飽和に達するようなパワーを入射することが必要である。

3. 種X線源

種X線源に我々はレーザープラズマX線 (Laser Plasma X-ray, LPX) を使用する。LPXは高強度レーザーをターゲットに集光照射したときに発生するプラズマから放射され

Fig.2 The result of the simulation by SDE-method. (a) The growth of SASE. (b) The 1/e radius of the radiation. The radiation wavelength is 13.5 nm.

るX線である⁷⁾。

ターゲット励起レーザーから種X線への変換効率の式を導くためにFig.3に示すようなモデル図を仮定する。この図の左側の部分はLPX発生部で右側はウィグラー、電子ビームである。励起用レーザーがターゲットに集光照射されると、ターゲット表面にプラズマが形成され、そのプラズマからX線が放射される。このモデルでは、放射されたX線のうち電子ビームとカップリングする立体角内に含まれるX線だけが種X線として使用されることになる。

種X線のパワー P_S は、LPXの総パワー P_X と、LPXが電子ビームとカップリングする効率 η_S とで、

$$P_S = \eta_S P_X \quad (1)$$

と表される。ここで P_X は、入射レーザーパワー P_L とその変換効率 η_C から、

$$P_X = \eta_C P_L \quad (2)$$

と表される。また、発生したLPXのパワーのエンベロープが球状である⁷⁾と仮定すると η_S は、

$$\eta_S = \frac{2r_b^2}{L^2} \quad (3)$$

と表すことが出来る。よって、入射レーザーから種X線への変換効率の式は、

$$P_S = \frac{2\eta_C r_b^2}{L^2} P_L \quad (4)$$

と表される。

Fig.3 This is a model for derivation of conversion efficiency. P_L , P_X and P_S are the power of incident laser, LPX and seed X-ray, respectively.

Fig.4に、距離 L を横軸にとった場合の種X線パワーを示す。この図では、入射レーザーパワー P_L を1GW、LPXへの変換効率 η_C を1%、電子ビームの半径 r_b を0.1mmとしている。種X線のパワーは距離の逆2乗に比例するため、大きな種X線パワーを得るには距離 L を小さくしなければならない。

前章で示したシミュレーションの結果より、種X線の効果を十分に発揮するには10kW程度のパワーが必要である。しかし、Fig.3に示した方式で10kWの種X線を発生させることは非常に困難である。それはLPXから種X線への効率が非常に悪い($\eta_S = 10^{-7}$)ことが主な原因であるが、逆にこのLPXを効率よく種X線として使用できれば、そのパワーは大きく改善されると言える。その方法として、Fig.5に示すような回転楕円体や放物面のような反射光学系によってLPXを集光することが考えられる。Fig.5に示した楕円体ミラーの前半部分は、ターゲットからのデブリがミラー面上に付着しないように取り除かれている。プラズマ発生点から角度 θ 内に放射されたX線が集光系に入る。

Fig.4 Seed X-ray power versus distance L . The distance is the space between target and wiggler. Incident laser power P_L , conversion efficiency η_C and electron beam radius r_b are 1 GW, 1 % and 0.1 mm, respectively.

Fig.5 The examples for enhancement the seed X-ray. (a) Ellipsoid mirror. (b) Combination ellipsoid and paraboloid.

$\theta \approx 25^\circ$ のとき、発生したX線の約10%がミラーによって集光される。このX線が全て種光になると見なすと、効率はおおよそ10⁶倍改善されることになる。この条件でFig.4のパラメータを用いると、種光パワーは1MWと計算される。

4. まとめ

装置規模の巨大さという、短波長自由電子レーザー(FEL)の抱える問題を、ウィグラーにマイクロウィグラーを使用し、これに種光を入射し増幅させるという方法で解決することを提案した。この種光の有効性を電子ビーム依存展開法によるシミュレーションで確かめた。その結果、10kWの種X線を入射した場合、発振波長64.9nmでは飽和に達するまでのウィグラー長は9mから3mに、また13.5nmの場合約20mから8mに短縮できることが示され

た。これにより共振器が使用できない短波長FELにおける長尺ウィグラーは小型化され、容易に実現可能な範囲になる。我々はこの種X線源としてレーザープラズマX線を考えている。この技術はすでに確立されており、導入は極めてスムーズに行われると考えられる。例えば、原子番号50のスズ(Sn)をターゲットに使用した場合、13.5nmに対して1%程度の変換効率が得られている。ただし、LPXから種X線への効率(10⁻⁷)を増加させるため、回転楕円体鏡や放物面鏡などの反射光学系でLPXを集光する必要がある。

参考文献

- 1) Y. Wu, V. N. Litvinenko, and J. M. J. Madey: Nucl. Instr. and Meth. **A341** (1994) 363.
- 2) W. Brefeld, B. Faatz, Y. M. Nikitina, J. Phlüger, P. Pierini, J. Roßbach, E. L. Saldin, E. A. Schneidmiller, and M. V. Yurkov: Nucl. Instr. and Meth. **A375** (1996) 295.
- 3) R. Tatchyn, J. Arthur, M. Baltay, K. Bane, R. Boyce, M. Cornacchia, T. Cremer, A. Fisher, S. J. Hahn, M. Hernandez, G. Loew, E. Miller, W. R. Nelson, H. D. Nuhn, D. Palmer, J. Paterson, T. Raubenheimer, J. Weaver, H. Wiedemann, H. Winick, C. Pellegrini, G. Travish, E. T. Scharlemann, S. Caspi, W. Fawley, K. Halbach, K. J. Kim, R. Schlueter, M. Xie, D. Meyerhofer, R. Bonifacio, and L. De. Salvo: Nucl. Instr. and Meth. **A375** (1996) 274.
- 4) M. Goto: Thesis of Osaka University (1999).
- 5) Y. Tsunawaki, Y. Okuda, N. Ohigashi, M. Kusaba, K. Imasaki, M. Fujita, K. Mima, and S. Nakai: Nucl. Instr. and Meth. (2000) (to be published).
- 6) 山本 正樹: 応用物理 **62** (1993) 676.
- 7) I. C. E. Turcu and J. B. Dance: X-Rays from Laser Plasmas. Generation and Applications (Wiley 1999) p.131.