

Kunioki Mima

Institute of Laser Engineering, Osaka University

ABSTRACT

The basic ideas of free electron laser (FEL) and laser accelerator (LA) and the present status of the researches are reviewed.

Since the oscillator experiment at Stanford University was successful in 1976, many FEL experiments both in the Compton and the Raman regimes have been done mostly on the amplification processes. The theoretical works on the radiation interactions with electron beams have been done and proposed some new ideas on the gain enhancement, for instances, the tapering of the wiggler period and strength, optical klystron, DC and RF field effects in the wiggler, laser induced cooling in a storage ring and so on. At present, the main effort in the FEL research seems on the oscillator experiments in the optical regime, because any oscillator experiments other than the Stanford experiment have not been successful so far.

The laser accelerator researches recently started. They are mainly theoretical works and still premature although the laser accelerator concept has attractive features which theoretically make 100 TeV accelerator possible. In this presentation, laser-plasma accelerator for ultra-high energies will be discussed.

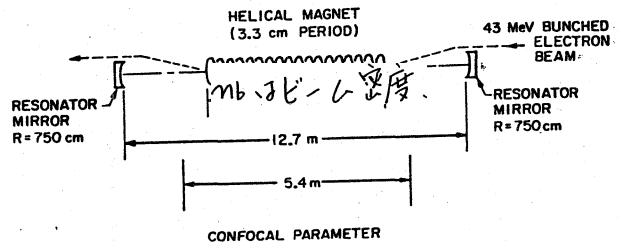
I. Free Electron Laser

I-1. 加速器への要請.

1977年、スタンフォード大学でLCAからのビームを用いたFELの発振実験に成功した。発振波長は約3μmであった。光共振器及び入リカルウィグラーの配置は図1に示す。この実験が成功した第1の理由としてLCAのビーム質の良さが上げられる。図の様に周期数が160もの長いウィグラーが有効に働くためには、ビームのエミッタンスが極めて良好でなければならぬ。コンプトン領域でのFELの最大利得は、長さL、周期λ₀、周期数N=L/λ₀のウィグラーにつき、ビームのウィグラー軸方向の速度広がり
が $\Delta v_z \ll v_z / 4N$ を満足するとき、

$$G = \frac{32 \epsilon_0 n_b k^2 L^3}{\pi (1+k^2)^{3/2} \gamma_p^3 \lambda_0} \quad (1)$$

となる。ここで、kはウィグラーパラメータ ($\lambda_0 e B_w / 2\pi m c^2$)、n_bはビーム密度、 $\gamma_e = \gamma_0 c^2$ は古典電子半径である。この場合、利得はL³



Configuration and dimensions of helical magnet and optical resonator for the 3 μm single pass FEL.

D. A. G. Deacon et al Phys. Rev. Lett. 38 ('77) 892 f)

に比例して増大するが、 $\Delta\gamma_2 > \gamma_2/4N$ になると、利得は L に比例するようになり、ワイグラーが有効に働かなくなる。スランフォードでの実験の場合、 $\Delta\gamma_2/\gamma_2 \leq 1.5 \times 10^{-3}$ が要求されている。ビームの半径、 r_b 及び $I \equiv \gamma^2 r_b^2$ に対し、ワイグラー中の軌道解析から、

$$\frac{\Delta\gamma_2}{\gamma_2} \approx \frac{1}{2} \frac{1}{1+k^2} \left\{ \left(\frac{\gamma^2 \epsilon^2}{\pi^2 r_b^2} \right)^2 + (2\pi)^4 \left(\frac{r_b}{\lambda_0} \right)^4 k^4 \right\}^{1/2} \quad (2)$$

と評価出来る³⁾。SCLAのビームは $\epsilon = 4 \times 10^{-22}$ mm rad、 $r_b = 0.5$ mm であり、 $k=1$ 、 $\lambda_0 = 3.3$ cm であることを考えると⁴⁾、 $\Delta\gamma_2/\gamma_2 \approx 2 \times 10^{-3}$ となり要求をほぼ満たしている。なお最適なビーム半径を $r_b \approx (\lambda_0 \epsilon / 2\pi^2 k)^{1/2}$ と評価すると 0.075 mm でありこのとき $\Delta\gamma_2/\gamma_2 = 7 \times 10^{-5}$ と実現出来る。

以上、高利得を実現し、FEL 発振に成功するには、質の良い電子を用いることが不可欠である。

I-2. その他の増幅実験；利得増大の立案と Storage Ring F.E.L. Experiments

ワイグラーの構造、配置により、小信号利得及び飽和利得の増大を計ることが考えられてきた。飽和利得の改善については、ワイグラー周期及び強度の Tapering⁵⁾、D.C. 及び RF Field の印加⁶⁾ による利得増大が提案され、Tapering の効果についてロスアラモス研究所、TRW 等が実験的に検証が行われた。特にロスアラモスの結果では、ビームから Radiation へのエネルギー変換率が 4% にも達し、この時のビームのエネルギー分布が Tapering Effects の特徴である Double Peak の分布にあることが観測されている。

一方、発振実験を成功させるには、小信号利得を上げることが本質的である。最近行われた新しい提案の一つが Optical klystron である⁷⁾。

図2の様に2個の Undulator が Dispersive section に連結されている。Undulator ①で Radiation によりビームのエネルギーが変調を受け、Dispersive section で Bunching され、Undulator ②での強い放射が起るようになる。この時の利得の増大は、通常ワイグラー ($L_d=0$) での利得曲線が Modulation を受け、最大利得が増大する。この方法を、直線部の長さが制限される Storage Ring の場合、比較的短い距離で高い利得を上げられることになり、この応用が考えられている。

ビームエネルギーから Photon への高効率変換という立場から、SR FEL は一つのモデルである。Orsay (ACO Storage Ring)

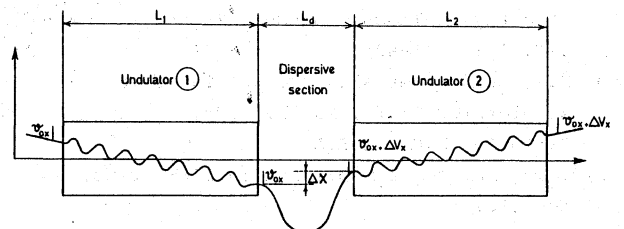


図2. Lay-out of the optical klystron and electron trajectory.

P. Elleaume, 'Free Electron Generations of Coherent Radiation' Edited by S.F. Jacobs et al., Vol. 8, 1982, p. 11

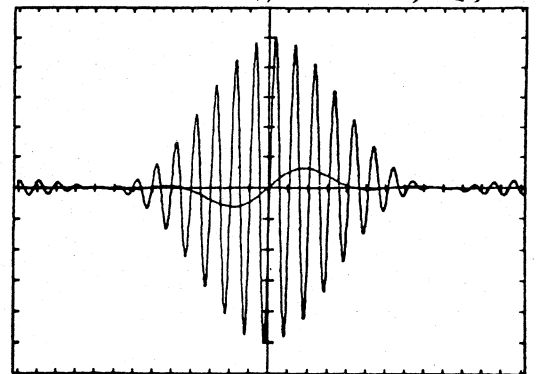


図3. Gain at first harmonic versus energy for $N_1 = N_2 = 7$ and $N_d = 0$ (smooth curve) and 53 (oscillating curve).

及び Frascati で実験が進められている。Orsay では超伝導アンジュレータ及び SmCo 磁石を用いた増幅実験が進められ、利得、Bunch Lengthening、Optical klystron の効果、等々各種の様な実験が進められている⁸⁾。図4には、レーザーに誘導された Bunch Lengthening の様子が示されている。これは比較的ビーム電流の小さい場合であるが、ビーム電流が 1mA 以上になると極口の異常が Dipole、Quadrupole mode の励起に伴い現われることが報告されている⁹⁾。

II. Laser Accelerator¹⁰⁾

この部分から講義にて。

Reference.

- 1) D.A.G.Deacon et al., Phys.Rev.Lett. 38 ('77) 892
- 2) K.Mima, 日本物理学会誌, 37, No.11, ('82) 906
- 3) C.Brau and R.Cooper, Phys.of Q.E. vol.7
'Free Electron Generators of Coherent Radiation' Edited by S.F.Jacobs et al., Addison-Wesley Pub. CO., 1980, p.660
- 4) J.N.Eckstein et al., Phys.of Q.E. vol.8
Ibid, 1982, p.49
- 5) P.Sprangle et al., Phys.of Q.E. vol.7
Ibid, 1980, 0.207
- 6) A.T.Lin and J.M.Dawson, Phys.Rev.Lett. 42
(1979) 1670 and T.Taguchi, K.Mima and T.Mochizuki, Phys.Rev.Lett 46 (1981) 824
- 7) P.Elleaume, Phys.of Q.E. vol.8, Ibid, 1982, p.119
- 8) M.Billardon et al., Proc.of Conf.on FEL, J.de Phys.Colloque, Bendor, France, 9/27-10/1, (1982)
- 9) K.E.Robinson et al., Proc.of Particle Accelerator Conf., March, 1983, Santa Fe, N.M., U.S.A.
- 10) T.Tajima, to be published in IEEE Trans. Nucl.Sci.

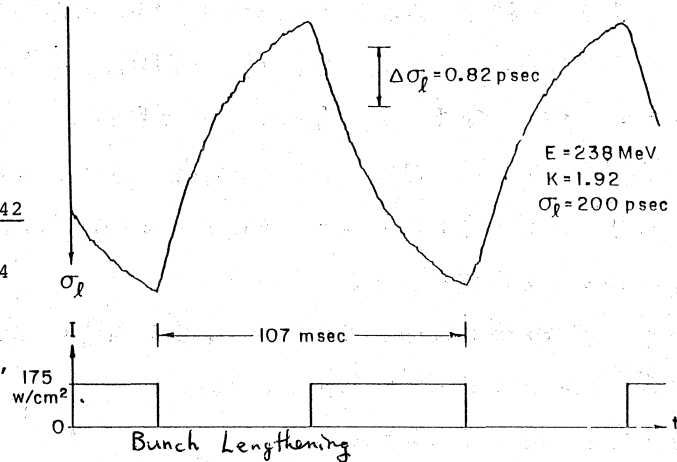


図4. Storage Ring と Laser の相互作用による Bunch Lengthening の測定。σ_L は電子ビームの長さ、下図は Chopped Laser Pulse.