

自由電子レーザーによる赤外光の発生

富増 多喜夫

Free Electron Laser (FEL, 自由電子レーザー) の名称は、当時スタンフォード大学にいた John Madey の命名によるもので¹⁾, FEL を発生する電子は通常のレーザーのように原子などの準位に束縛された電子でない“自由電子”ということで名付けられた。

図1にFEL装置の例を示す。高速電子ビームを供給する電子加速器と電子ビームを蛇行させるアンジュレーター(undulator), アンジュレーターと偏向電磁石を狭むように配置された光共振器(合わせ鏡)で構成されている。

1 mm 径で2 mm 長程度のラグビーボール状の電子塊がアンジュレーターで蛇行して発生した波長 λ のパルス光を、合わせ鏡の間を往復させる。パルス光は往路で後続の電子塊と重ね合わせ、後続の電子塊による光エネルギーをパルス光に加えて光パワーを増幅する。これを繰り返すと光パワーは指数関数的に増加し、光共振器内の光ピークパワーは電子ビームのピークパワー(赤外域用電子リニアックで数十 MeV \times 数十 A で GW レベル) 程度になる。

FEL 波長 λ は次式で与えられる²⁾。

$$\lambda = \lambda_0 (1 + K^2/2) / (2\gamma^2) \quad (1)$$

ここで、 λ_0 はアンジュレーターの周期長[m], K は電子の蛇行(準正弦波運動)を特徴づけるパラメーターで

$$K = 93.4 B_0 [T] \cdot \lambda_0 [m] \quad (2)$$

であり、 B_0 はアンジュレーターのピーク磁場強度である。

式(1)の γ は運動エネルギー E をもつ電子の静止エネルギー m_0c^2 を単位とする全エネルギーで、次式で与えられる。

$$\gamma = 1 + E/m_0c^2 \quad (3)$$

FEL は通常レーザーのコヒーレントで単色という長所に加えて、式(1)より FEL 波長 λ が K と γ の値によって任意に変えられ、出力も媒質に制限されないという長所を兼ね備えている。特に、アンジュレーターの K 値は磁極間隔を変えることにより容易に変えられるので、数秒で波長を1オクターブ変えることができる。

図2に自由電子レーザー研究所(FEL研, FELI)の4台のFEL装置と光伝送系パイプ, 165 MeV 電子リニアックを示す³⁾。FEL装置から利用実験室への光伝送パイプとして、FEL装置1(5~22 μm)用, FEL装置2(1~6 μm)用とFEL装置4(20~80 μm)用, FEL装置3(0.23~1.2 μm)用の3系統が用意されている。

モニター室に用意された赤外~遠赤外域 FEL ビーム診断装置で FEL のスペクトル, 平均パワー, 20 μs 近くあるマクロパルス波形が常時計測され, 利用研究のデータ解析に供されている。FEL ミクロパルス長は, 赤外域で約 3 ps, 可視~紫外域で 0.8~2.7 ps であり, 必要に応じてストリークカメラなどで測定されている。

FEL 装置1光共振器の1.5 mm 径のミラー孔から引き出された約 10 MW (共振器内パワーの 0.5%) ビームは回折効果で広がるが, 金コートした集光ミラーでビーム径が数 cm 以下に集光されて利用実験室まで伝送される。途中で最多 9 枚の金コートミラーと ZnSe か KRS-5 の窓を通るのでパワーは 6 MW に減少する。モニター室では 90° 扇形ミラーで 1/4 ビームが分配され, ビーム診断のほかアプリケーションに伴う ZnSe 等からのルミネセンス特性が測定されている⁴⁾。残りの 3/4 ビームは実験室に送られ, 扇形ミラーによる分配で複数ユーザーによる FEL の同時使用が行われている。

発振スペクトル幅($\Delta\lambda/\lambda$, FWHM)の実験値(計算値)

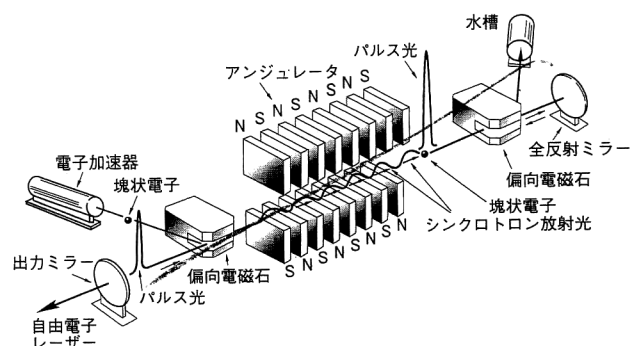


図1 FEL装置の例。

(株)自由電子レーザー研究所 (〒573-0128 枚方市津田山手 2-9-5)
E-mail: tomimasu@feli.co.jp

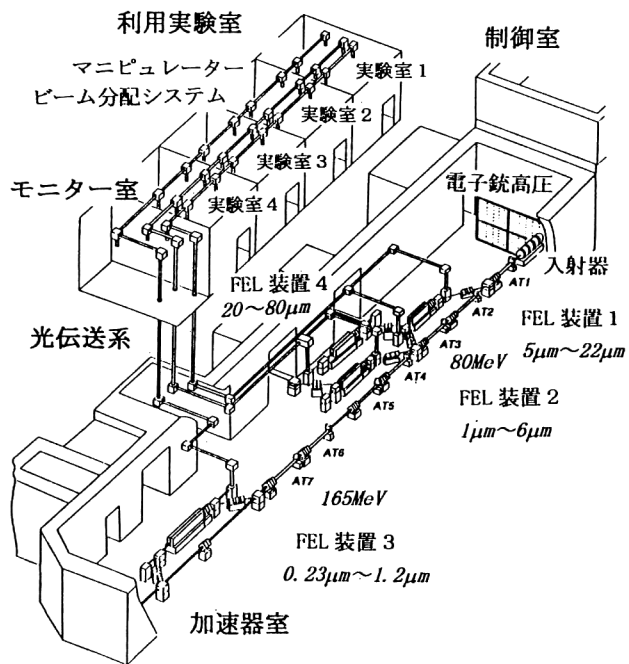


図2 自由電子レーザー研究所の165 MeV電子リニアック、中赤外、赤外、可視紫外、遠赤外をカバーする4台のFEL装置、光伝送系、モニター室と利用実験室。

は、可視～紫外域で0.08% (0.064%)、6 μmで0.5% (0.95%)で、括弧内の計算値は次式で求められた³⁾。

$$(\Delta\lambda/\lambda)_L = (1/\pi) \cdot (\lambda/N\sigma_z)^{1/2} \quad (4)$$

ここで、λはFEL波長、Nはアンジュレーターの数、σ_zは電子塊の進行方向のマイクロパルス長(標準偏差)である。

5~12 μm域のFELマイクロパルス長は約18 μsで、10~20 Hzで繰り返す。FELマイクロパルス数は89.25 MHzマイクロパルス-10 Hzマイクロパルス運転で毎秒16000である。マイクロパルス当たりの光エネルギーは30 μJで、マイクロパルス長は多重量子井戸によるpump-probe法で約3 psと測定されていて⁵⁾、マイクロパルスのピークパワーは10 MWである。このようにして計算されたFEL研(FELI)のピーク出力を国外のFEL利用研究施設のFELや通常レーザー、放射光のピーク出力を比較して図3に示した⁶⁾。

各施設の略称名近くの横長の実線は、利用できる光の波長域とピーク出力を示す。8つのFEL施設のうち、UCSB(カリフォルニア大学サンタバーバラ校)は遠赤外からミリ波域、FELIは紫外から遠赤外域のFEL利用が可能である。CO₂レーザー、Ndガラスレーザーは縦長の実線でTW以上のパワーを利用できること、色素レーザーの山型

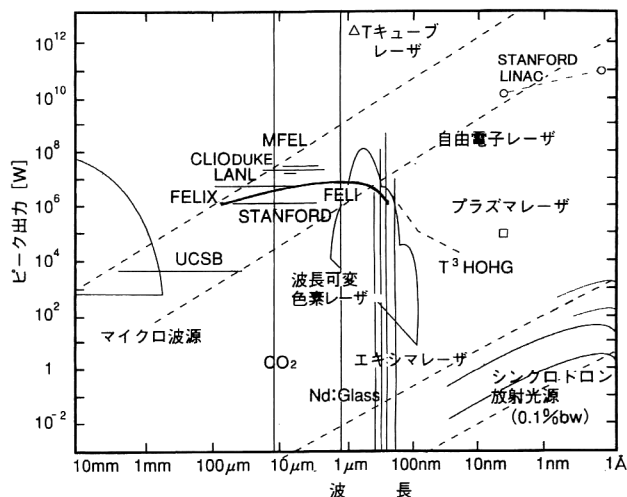


図3 FEL装置レーザー、シンクロトロン放射光のピーク出力。FELI:自由電子レーザー研究所、UCSB:カリフォルニア大学サンタバーバラ校、STANFORD:スタンフォード大学、FELIX:オランダFOM、LANL:ロスアラモス国立研究所、CLIO:フランスRURE、DUKE:米国デューク大学、MFEL:バンダビルト大学、STANFORD LINAC:スタンフォード大学SLAC(計画中)。

実線で赤外から紫外域でMWレベルの出力が得られることを示す。FELの利用において照射試料の分子振動に共鳴する波長とピークパワー密度の選択が不可欠なことはSiCなどのアニーリングで実証されていて⁷⁾、図3の波長可変域はFEL利用に大きな可能性があることを示唆している。

文 献

- 1) J. M. J. Madey: J. Appl. Phys., **42** (1971) 1906.
- 2) 電気学会編:自由電子レーザーとその応用(コロナ社, 1990);自由電子レーザー研究専門委員会編:入門自由電子レーザー(日本原子力学会, 1995).
- 3) T. Tomimasu, E. Oshita, S. Okuma, K. Wakita, T. Takii, S. Nishihara, A. Nagai, H. Tongu, K. Wakisaka, Y. Miyauchi, K. Saeki and A. Kobayashi: Nucl. Instrum. & Methods A, **393** (1997) 188.
- 4) M. Yasumoto, N. Umesaki, T. Tomimasu, T. Takii, Y. Kanazawa and A. Zako: to be published in Nucl. Instrum. & Methods B.
- 5) T. Suzuki, T. Mitsuyu, K. Nishi, H. Ohyama and T. Tomimasu: Appl. Phys. Lett., **69** (27) (1996) 4136.
- 6) T. Tomimasu: Proc. AFEL '97 (FELI, Jan. 21-24, 1997) pp. 347-352; J. Murphy: Synchrotron Light Source Bata Book (BNL, Upton, New York, 1996) p. 36.
- 7) H. Ohyama, T. Suzuki, K. Nishi, T. Mitsuyu and T. Tomimasu: Appl. Phys. Lett., **71** (6) (1997) 823.

(1998年3月30日受理)