

解説

自由電子レーザーとその利用研究

富増 多喜夫

(株)自由電子レーザー研究所*

Free Electron Laser and Its Application Researches

Takio TOMIMASU

Free Electron Laser Research Institute, Inc. (FELI)

Much activities throughout the world in developing FEL facilities and pursuing a broad range of applications are reviewed. The principle of free electron laser (FEL) generation and the general characteristics of FEL beam such as wavelength tunability, pico-second pulse, MW-power level are described. The FEL facilities covering from 278 nm to 40 μm and researches for industrial applications at the Free Electron Laser Research Institute, Inc. (FELI) are described in details. Prospects for compact, high power FEL facilities and applications for industrial applications including bio-medical applications are also discussed.

1. はじめに

在来のレーザーは、ヘリウム・ネオンや炭酸ガスなどの原子や分子の励起状態から放射される波長と位相の揃った光である。したがって、波長は大きく変えられず、出力も媒質の排熱効率によって制限される。しかし、レーザーが小型であり、技術的にも容易なこともあって、1960年にメイマンによるルビーレーザーの発明後、数年のうちに気体、固体、液体を媒質とする多種多様のレーザーが開発された。1970年には半導体レーザーの常温発振も達成され、レーザーは加工技術、医療応用、通信、計測制御などを支える基盤技術として成長している。

自由電子レーザー (Free Electron Laser : 略して FEL) の名称は、1971年当時スタンフォード大学にいた John Madey の論文で初めて出てくる¹⁾。FEL を発生する電子は、原子などに束縛されない自由電子だという意味で付けられた。高速電子 (自由電子) ビームが真空中で規則的に蛇行するとシンクロトロン放射光 (synchrotron radiation : 略して SR) を放射する。SR は白色光なので、このままではレーザーにならない。しかし、蛇行ごとに発生する SR の方向が揃いビーム状に絞られると、SR が干渉し合って単色光が発生する。FEL はこの単色光を増殖、発振させたものである。

図 1 は FEL 装置の例で、高速電子源である電子直線加速器 (電子リニアック)、高速電子を蛇行させるアンジュレーター (undulator, wiggler ともいう)、合わせ鏡で

きた光共振器で構成されている。FEL は、1 mm 径近くに絞られた塊状電子群 (電子バンチ) がアンジュレーターで周期的蛇行により発生した単色光を10億倍以上 (GW レベル) に強めたもので、FEL 装置は高利回りを保証した光の銀行の役割りを果たす。

2. 自由電子レーザーの発生

(1) 高速電子の蛇行による単色光の発生

高速電子の振動や円運動によって電波や SR が放射される。電子が発見されてから50年後の1947年に SR が GE 社の70 MeV 電子シンクロトロンで観測されている。1950年頃オックスフォード大学からスタンフォード大学に来ていた Hans Motz はアンジュレーターを開発して電子リニアックの電子ビームを蛇行させ、ミリ波や可視光の発生²⁾とその理論解析にも成功した³⁾。

図 2 にアンジュレーターによる高速電子の周期的蛇行によって放射される SR の特徴を示す。電子が振動すると電波が発生し、四方に広がる。電子が振動しながら高速 v で一方向に動くと、進行方向に放射される電波はドップラー効果によって短波長化され、高速電子の相対論効果で指向性を持つようになる。速度 v が光速 c に近づくにしたがって、電波はマイクロ波、ミリ波、赤外線、可視光、紫外線、軟 X 線、X 線となる。これらの電磁波は SR と呼ばれる連続スペクトル光であるが、干渉効果によって単色光となる。FEL の発生では、干渉効果による SR の単色

* (株)自由電子レーザー研究所 〒573-0128 枚方市津田山手 2-9-5
TEL 0720-96-0410 FAX 0720-96-0421 e-mail tomimasu@feli.co.jp

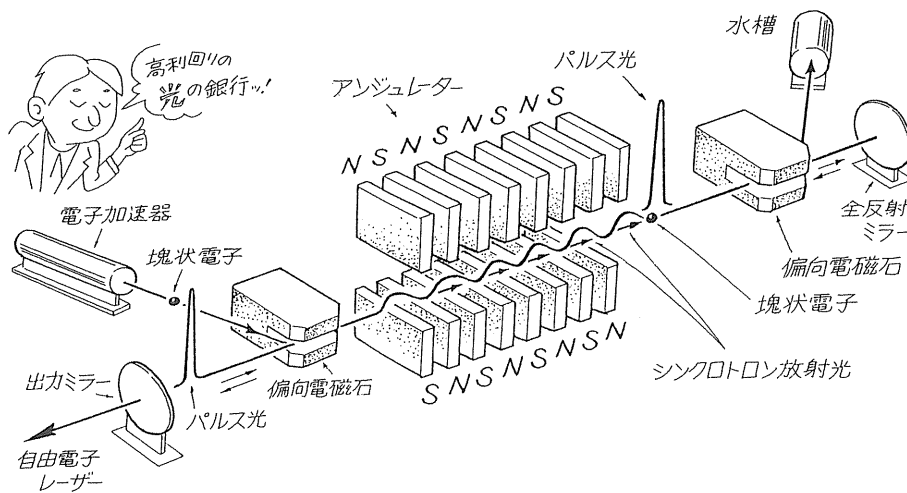


Figure 1. Schematic layout of a free electron laser facility (accelerator, undulator and optical cavity).

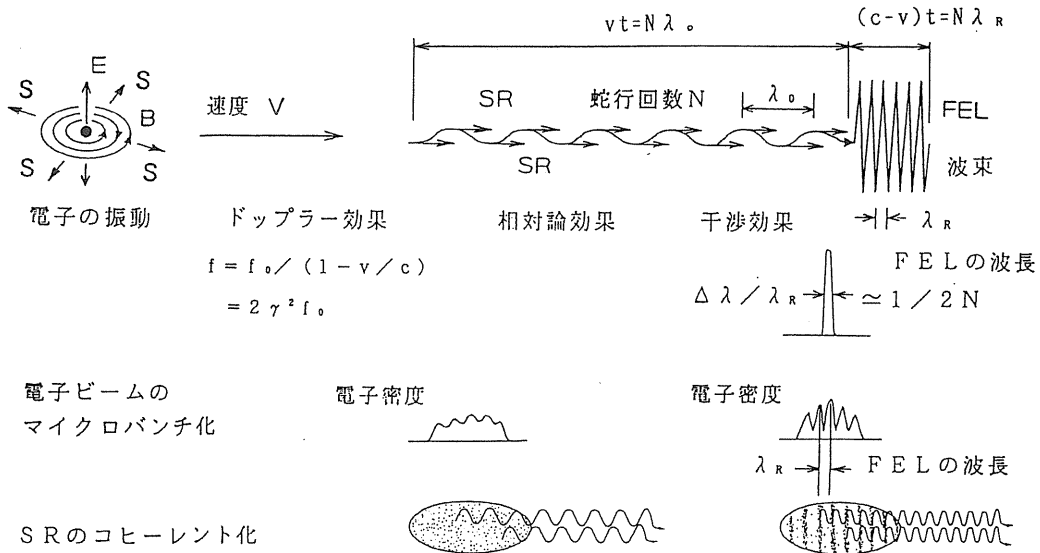


Figure 2. Schematic illustration on narrowing of radiation band width and periodic density modulation of electron bunch induced by periodic undulation.

化と相対論効果による前方指向性は極めて重要である。

このように高速電子が周期的蛇行をすると、蛇行毎に放射されるSRの強さはN回の蛇行で2N倍となる。蛇行毎に放射される光の位相が、特定波長 λ_R の光の波長と揃うと干渉効果によって波長 λ_R の光の強度は $4N^2$ 倍になる。また、光のスペクトル幅($\Delta\lambda/\lambda$)は、電子ビームのエネルギー幅とエミッタンスが小さい場合には $1/(2N)$ 程度の準単色光となる。同時に、蛇行によって電子は周期的に加速・減速の力を受けて電子群は特定波長の間隔にマイクロバンチ化され、図2の右下に示すように光の位相が揃ったコヒーレント光 (self amplified spontaneous emission, SASE) が発生する。

図2に示した周期長 λ_u 、周期数Nを持つアンジュレー

ター内を速度 v 、バンチ長 σ_z の電子群が時間 t かかってN回蛇行してアンジュレーターを通過したとする。この時、電子群が最初の蛇行で発生した特定波長 λ_R の光子群が続き、結局全部でN個の光子群となる。すなわち、

$$\lambda_R = (c-v)t/N = \lambda_u(1-\beta)/\beta, \quad (1)$$

高速電子の相対速度 β が1に近づくと

$$(1-\beta)/\beta = (1-\beta^2)/[\beta(1+\beta)] \cong 1/(2\gamma^2), \quad (2)$$

が導かれ、共振波長 λ_R は次式で表される。

$$\lambda_R \cong \lambda_u / (2\gamma^2). \quad (3)$$

ここで、 γ は運動エネルギー E を持つ電子の静止エネルギー mc^2 を単位とする電子の全エネルギーであり、次式で表される。

$$\gamma = E/mc^2 + 1 = (1 - \beta^2)^{-1/2}. \quad (4)$$

共振波長を正確に表すには、蛇行による電子走行距離を考慮する必要があり、その場合の共振波長 λ_R は次のようになる。

$$\lambda_R = \lambda_u (1 + K^2/2) / (2\gamma^2). \quad (5)$$

ここで、 K は電子の蛇行（近似的には正弦波運動）を特徴づけるパラメーターで、

$$K = 93.4 B_u \cdot \lambda_u \quad (6)$$

であり、 B_u [T]、 λ_u [m] は、それぞれアンジュレーターのピーク磁場強度、および1周期長である。

(2) 自発放出光と発振 FEL のスペクトル

エネルギー幅 $\Delta E/E$ 、規格化エミッタンス ϵ_n の電子ビームが周期数 N 、磁場パラメーター K のアンジュレーターを通過した時発生する自発放出光のスペクトル幅（半値幅）は次式で近似できる⁴⁾。

$$(\Delta\lambda/\lambda)_s = [(1/2N)^2 + (\Delta E/E)^2 + f(\epsilon_n, K)]^{1/2}. \quad (7)$$

一般に、電子リニアックのビームは、エネルギー幅で0.3–1.5% (FEL 研, ~1%) 規格化エミッタンスで10–100 π mm•mrad (FEL 研, 26 π mm•mrad) と悪いので自発放出光のスペクトル幅 (FWHM) も数%近くなる。

図3(左)にFEL研のFEL装置3 (FEL-3, $N=67$, $K=$

1.4) に130 MeV 電子ビームを通した時の0.6 μ m の自発放出光スペクトル (半値幅=4.5%) を、図3(右)に0.603 μ m (半値幅=0.08%) 発振スペクトルを示す。約4.5%の自発光スペクトル幅の大半は、電子ビームのエネルギー幅とエミッタンスによるものである。しかし、発振するとスペクトル幅は自発光スペクトル幅の50分の1以下となり、輝度が数桁向上する。

3. FEL 装置と利用研究施設の開発

FELの発明者である Madey らはスタンフォード大学で開発されていた43 MeV 超伝導リニアックからの質の良い電子ビームが FEL 発振に不可欠と考え、超伝導ヘリカル・アンジュレーターと光共振器を試作して、1976年暮れに3.4 μ m FEL の発振に成功した⁵⁾。

その頃の日本では71年から73年に電子技術総合研究所(電総研)にいた筆者らが Si と Ge の結晶軸に沿って24.8 MeV 電子ビームが螺旋運動をして放射するチャネリング放射による異常エネルギー損失を初めて観測した^{6,7)}。1979年には電総研の近藤による FEL 発振に関する調査報告⁸⁾、1982年には大阪大学の三間による FEL の解説⁹⁾、1983年には金沢大学の川崎らによるセンチ波発生実験報告¹⁰⁾がある。1980年代の日本では、リソグラフィ光源として10台の小型電子蓄積リングが開発され¹¹⁾、軍事用のSDI計画の影響もあって FEL 装置の開発では米国に10年の遅れをとった。しかし、1990年に電総研と川崎重工(株)で試作した小型リング NIJI-4 は¹²⁻¹⁴⁾、1998年10月の0.212 μ m 世界最短波長記録達成に役立っている¹⁵⁾。

スタンフォードでの赤外域発振成功後、Madey はより短波長の FEL 発振に興味を持ち、電子蓄積リングの高エネルギーで質の良いビームに注目するようになった。1983年には Madey らは南パリ大学の ACO リングを用いて0.63 m 可視 FEL 発振に成功し¹⁶⁾、スタンフォード大学で FEL 用蓄積リングの試作を始めたが果たせず、1986年には同年に Benson らと発振実験に成功した赤外域 FEL 装置 Mark III¹⁷⁾と試作した蓄積リング部品等と共にデュ

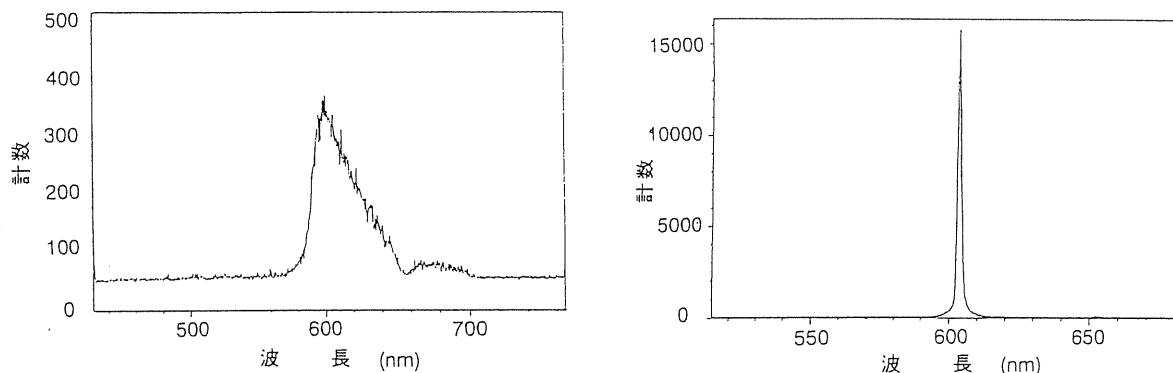


Figure 3. Spectra of visible spontaneous emission (left) and 0.603- μ m FEL (right).

ーク大学に移り1 GeV リングによる深紫外 FEL 発振計画を推進した¹⁸⁾。

1983年にはスタンフォード大・TRW 社のチームが電子リニアックを用いて1.6 μm で MW 台のピーク出力を達成したが¹⁹⁾、同年に始まった SDI (宇宙防衛構想) 計画では、ロスアラモス国立研究所 (LANL) やボーイング社 (BOEING) などの企業を中心に3000億円を超える予算と11年という歳月を費いやして FEL 研究が推進された²⁰⁾。結果的には LANL の小型 FEL 装置²¹⁾ 以外は、BOEING の可視域 FEL 装置もリング型共振器の制御も含めて所期の成果は得られていない²²⁾。

世界初の利用研究施設は1985年に稼動したカリフォルニア大学サンタバーバラ校 (UCSB)²³⁾ で、1990年以後にはスタンフォード大学 (STANFORD)²⁴⁾、バンダビルト大学 (MFEL)²⁵⁾、デューク大学 (DUKE)²⁶⁾ に FEL の利用研究施設が設置された。1991年になると、オランダ FOM の FELIX²⁷⁾、1992年にはフランス LURE には CLIO²⁸⁾、1994年には日本で FELI²⁹⁾ と呼ばれる FEL 利用研究施設が稼動した。表1は世界の FEL 利用研究施設の電子加速器、初発振、波長域、ピーク出力 (平均出力)、研究テーマ等を示す。

これらの施設では、FEL の波長可変の特長を生かして生体アブレーションによる外科、歯科、眼科など医療技術への利用、半導体超格子構造や酸化物超伝導体といった新材料の電子構造解析への利用など新しい産業の芽を育てる利用研究が数多く発表されている³⁰⁾。

わが国の FEL プロジェクト研究としては、1984年によ

うやく科学技術庁振興調整費で研究が始まり、その後原子力試験研究費によるクロスオーバー研究の一つとして FEL 研究が継続された。これは日本原子力研究所の超伝導リニアックを用いる FEL 装置の建設、電総研でのアンジュレーター技術、理化学研究所と動力炉・核燃料開発事業団 (動燃) による光共振器用光学材料の開発を中心としたものであった。

日本初の FEL 発振は、1991年3月電総研の TERAS リングを用いて筆者らによって達成されている^{31,32)}。その後、分子科学研究所 (UVSOR)³³⁾、電総研・川崎重工業 (株) (NIJI-4)³⁴⁾、東京大学工学部・自由電子レーザ研究所 (S-band Linac)³⁵⁾、大阪大学産業科学研究所 (L-band Linac)³⁶⁾、住友電工(株)³⁷⁾、最近では日本原子力研究所 (JAERI)³⁸⁾ で FEL 発振を達成している。利用研究への活用を期待したい。

図4は国内で FEL 装置を開発している研究所または FEL 装置のニックネームを示す。符号の位置は、電子加速器のエネルギーと FEL 波長を、符号の種類で加速器の種類を表す。国内外合わせると90以上のプロジェクトが進行中であるが、実際に利用研究に使える施設は表1で示した7つの利用研究施設にすぎない。

(株)自由電子レーザ研究所 (FELI) は、1991年3月28日に基盤技術研究促進センターと民間13社が出資して設立され、1997年3月末までの6年4日で産業用 FEL 装置と利用技術を開発する激しい計画であった。しかし、フォトカソード電子銃より長寿命で安定な熱陰極電子銃の活用、熱陰極電子銃から0.5 ns グリッド・パルサーで放射される

Table 1. Electron accelerators, FEL outputs and research subjects at FEL user facilities

| 研究所 | 電子加速器 | 電子銃 | 初発振 (建物建設年) | 波長域 λ (μm) | ピーク出力 (平均出力) | 研究テーマ |
|--------------------------------------|---|---------------|----------------|------------------------------------|-----------------|------------------|
| Stanford Univ. (USA) | 超伝導リニアック 66 MeV, 5.6 A | 熱陰極 | 1976 | 3~15 | 1.2 MW | 物性物理 |
| | | | | 15~60 | (1 W) | 生物・医学 |
| UCSB (USA) (Mark III) | バンデグラフ 6 MeV | 熱陰極 | 1985 | 350~2500 | (10 kW) | 半導体物性 |
| | | | | 60~350 30~90 | | |
| Duke Univ. (USA) (Mark III) | 常伝導リニアック 45 MeV, 40 A | 熱陰極 RF Gun | 1986 | 1.8~9.5 | 2 MW (3 W) | 物性物理 |
| | | | | | | |
| Vanderbilt Univ. (USA) (Mark III) | 常伝導リニアック 45 MeV, 40 A | 熱陰極 RF Gun | 1991 (1987) | 2~8 | 3 MW (12 W) | 生物・医学 物性物理 |
| | | | | | | |
| FOM FELIX (Netherlands) | 常伝導リニアック 45 MeV, 70 A | 熱陰極 | 1991 | 5~22 | 5 MW (1 W) | 原子・分子物理 生物・医学 |
| | | | | 16~180 | | |
| LURE CLIO (France) | 常伝導リニアック 70 MeV, 75 A | 熱陰極 | 1992 | 1.8~17.5 | 10 MW (9 W) | 物性物理 |
| | | | | | | |
| FELI (Japan) | 常伝導リニアック 33 MeV, ~60 A 75 MeV, ~60 A 165 MeV, 60~100 A 33 MeV, ~60 A 20 MeV, ~40 A | 熱陰極 RF Gun | (1993) | 4.6~20 | 10 MW (1 W) | 半導体物性 |
| | | | | 1~6 | 5 MW (0.5 W) | 同位体分離 |
| | | | | 0.23~1.2 | 5 MW (0.5 W) | 医療応用 |
| | | | | 18~80 | 5 MW (0.5 W) | 生物工学 |
| | | | | 50~100 | [2 MW (1 W)] | 新材料 |

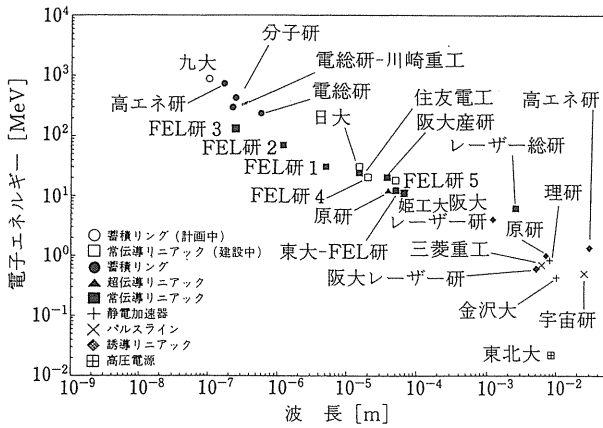


Figure 4. FEL projects in Japan. The position of the name or the acronym of the Institute shows the shortest wavelength or planned at the Institute and electron energy, and the mark shows a kind of accelerator.

120 keV ビームを低エミッタンスで短パンチ化できる入射器³⁹⁾, 24 μ s パルスマイクロ波源⁴⁰⁻⁴²⁾や6.72 m 長光共振器⁴³⁾, 偏向角22.5°のS字型ビーム輸送系⁴⁴⁾, 等の開発が進み, 1994年10月にFEL装置1 ($\lambda_u=3.4$ cm, N=58)でMW級の6 μ m FEL発振に成功した⁴⁵⁾。その後FEL装置2 ($\lambda_u=3.8$ cm, N=78)でも発振して4.8~14 μ mと広がり⁴⁶⁾, 1995年10月からは世界で7番目のFEL利用研究施設として, 1996年と1997年の2年間で4,800時間バイオ・医療, 半導体応用の利用研究に使用された。

1995年12月には, 光の回折による発振波長限界から熱陰極電子銃ではビームのエミッタンスが大きくて無理とされていた電子リニアックによる0.34 μ m という世界最短波長での発振をFEL装置3 ($\lambda_u=4$ cm, N=67)で達成した⁴⁷⁾。1996年6月には0.278 μ m 発振にも成功^{48,49)}, 1997年1月にはFEL装置4 ($\lambda_u=8$ cm, N=30)で18~40 μ mでも発振し, 紫外から遠赤外域をカバーする世界初のFEL利用研究施設となっている⁵⁰⁾。

図5にFEL研の165 MeV電子リニアック, 電子ビーム輸送系, 遠赤外, 中赤外, 赤外, 可視~紫外域をカバーする4台のFEL装置, 光伝送系及びモニター室と4つの利用実験室への伝送系⁵¹⁾を示す。利用実験室2にはマンピュレータが2台設置され, 直径3 m以内に4.6~14 μ m FELを0.1 mm径に絞って照射できる。

4. FELビーム特性

(1) 電子ビームとFELビームのパルス特性

図6に電子ビーム(下)とFELビーム(上)のパルス特性を示す。電子ビームのパルス特性は, 熱陰極電子銃用0.5 ns グリッド・パルサーの周波数, 加速管でのパンチ長(数ps), 加速管に供給されるマイクロ波のパルス長でまらる。FEL研電子リニアックの電子ビームは, 数ピコ秒長にパンチ化された0.6 nCのパンチの列が22.3125 MHz

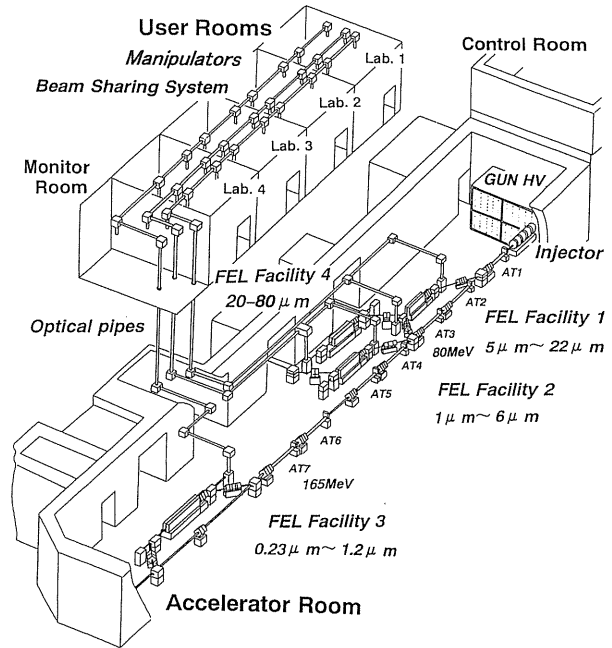


Figure 5. Bird's eye view of 165-MeV linac, four FEL facilities, optical pipes and use rooms at the FELI.

(44.8 ns 間隔), 又は89.25 MHz (11.2 ns 間隔)で24 μ s 続く。数ピコ秒長の電子パンチがマイクロパルスで, ミクロパルスが24 μ s 続いたものがマクロパルスである。図6(左下)は24 μ s マクロパルスの例である。このマクロパルスが1~20 Hzで繰り返す。24 μ s マクロパルス運転は平均出力の増強と紫外域発振に役立った。FELマクロパルス(時間)長は, 図6(左上)に示すように18 μ sで, 毎秒毎のFELマイクロパルス数は, 4000 (22.3125 MHz~10 Hz)~32000 (89.25 MHz~20 Hz)である。FELのマイクロパルス長は0.8~3.2 psで, 光共振器長や加速位相の微調によって変わる。

電子パンチがパルス光と重なり合ってアンジュレーターを通過するときパルス光が得るパワー利得をGとし, パルス光がミラー間を往復すると2回ミラーで反射されるが, その際の損失を α とすると, パルス光と電子パンチがアンジュレーターを通過するごとに光パワーは $[1+(G-\alpha)]$ 倍となる。したがって, パルス光が電子パンチとアンジュレーターをn回往復すると, 光パワーは指数関数的に増加し, 最終的には $[1+(G-\alpha)]^n$ 倍になる。たとえば, $G-\alpha=0.18$, $n=128$ の場合では光パワーは約16億倍となる。Gを小信号・短パルス利得と呼ぶ。Gの値はヨーロッパのグループによって開発された半実験式⁴⁾を用いて計算され, 赤外~遠赤外域の実験データは説明できる。自発放射光パワーを P_u , 飽和パワーを P_s とすると, τ_s は次式で与えられる。

$$\tau_s = 2(L_c/c) \ln(P_s/P_u) / \ln[1+(G-\alpha)] \quad (8)$$

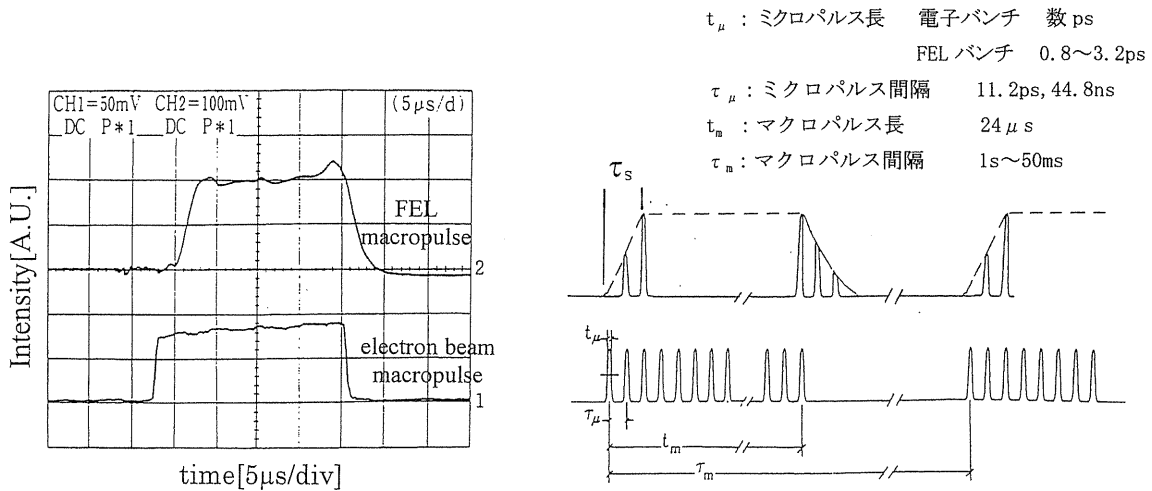


Figure 6. Micropulse and macropulse structure of electron beam (lower) and FEL beam (upper).

図 6 の場合, $L_c=6.72$ m, $G-\alpha=0.18$ から τ_s は約 $6 \mu s$ となる。FEL 研の場合, 光共振器内の光パワーは 2 GW となり, FEL パワーとして外部に取り出すのはこの 0.5% で, 10 MW である。FEL 出力が飽和に達するまでの時間 τ_s は, ほぼ利得 G に反比例し, 光共振器長 L_c に比例する。

(2) FEL ビームの診断と分配

図 7 と図 8 は, モニター室の赤外~遠赤外域ビーム診断装置と可視~紫外域ビーム診断装置を示す。ここで, FEL のスペクトル, 平均パワー, マクロパルス波形が常時測定されている。FEL のマイクロパルス (時間) 長は必要に応じてストリークカメラなどを用いて測定される。図 7 の赤外~遠赤外域ビーム診断装置は, 図 5 に示した FEL 装置 1, 2, 4 用で, それぞれの光共振器ミラー孔 (それぞれ $1.5 \text{ mm}\phi$, $0.5 \text{ mm}\phi$, $2.5 \text{ mm}\phi$) から取り出されたビームは回折効果で拡がるが, 集光ミラーでビーム径が数 cm 以下になるように利用実験室に伝送される。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 FEL 出力は約 6 割に減少する。モニター室では適当な大きさの 90° 扇形ミラーで FEL ビームの 1/4 が診断用に分配され, 残りは実験室に伝送される。1/4 ビームでも診断には十分で, レーザーアブレーションに伴うルミネッセンス特性の測定も行われている⁵²⁾。このように扇形ミラーによるビーム分配で複数ユーザーによる同時使用が可能になっている。

(3) FEL の出力とスペクトルの安定性

図 9 は, FEL 研の $7.1 \mu m$ FEL (上) と 29.0 MeV 電子ビーム (下) のマクロパルス波形の変動をオシロスコープで 5 分間記録したものである。FEL 波形は HgCdTe 検出器から, 電子ビーム波形はボタンモニターから得られた。

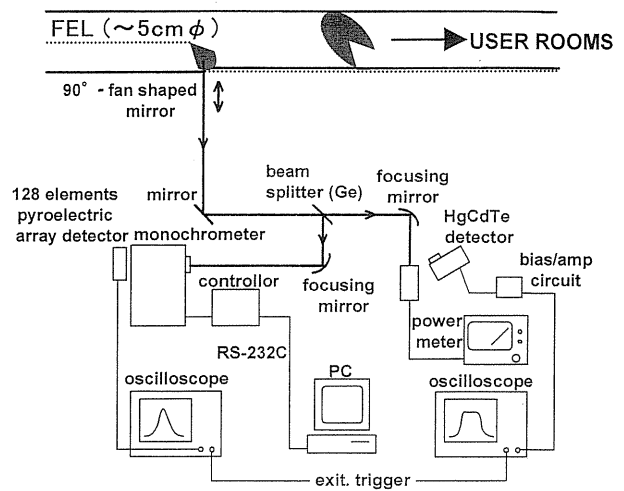


Figure 7. FEL beam sharing and IR- and FIR-FEL beam diagnostic system.

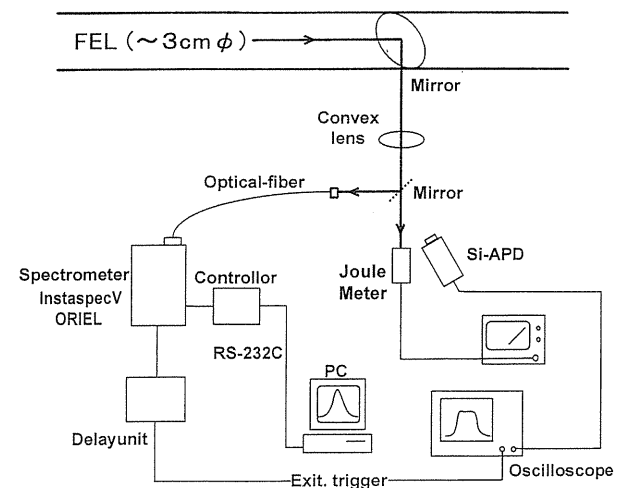


Figure 8. UV- and Visible-FEL beam diagnostic system.

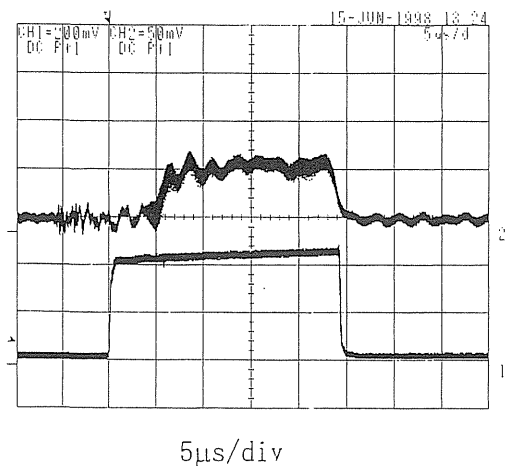


Figure 9. 7.1- μm FEL macropulse (upper) and 29.0-MeV electron macropulse (lower) accumulated for 5 min.

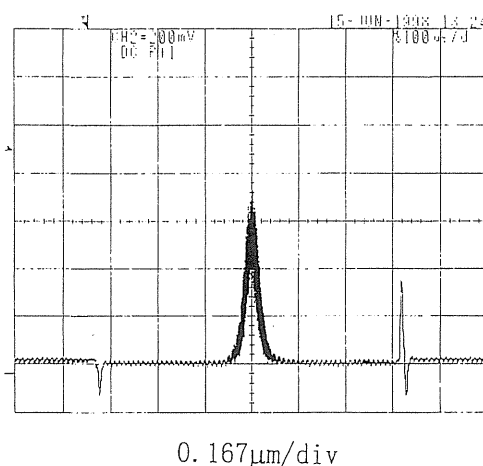


Figure 10. 7.1- μm FEL spectrum accumulated for 5 min.

電子ビームのマクロパルス長は24 μs で、立ち上がりから6 μs の所にリップルが見られる。これは1分に1回ほど生ずるが、これに応じてFELのマクロパルス波形には数 μs にわたって僅かな下がりが見られる。図10は同時に観測された7.1 μm FEL スペクトルで、リップルによるスペクトルへの影響は見られない。スペクトルの半値幅(0.64%)も次式で説明できる。

$$(\Delta\lambda/\lambda)_L = (1/\pi)(\lambda_R/N\sigma_z)^{1/2} \ll (\Delta\lambda/\lambda)_s \quad (9)$$

ここで、 σ_z は電子ビーム進行方向 (Z 方向) の電子バンチ長 (標準偏差) を示す。

マイクロパルス出力の安定度は $\pm 20\%$ 程度と良くないが、平均出力は図9に示すように $\pm 10\%$ 程度、中心波長の安定度はスペクトル幅の1/10以下と安定していて、波長可変もアンジュレータの磁場強度を変えることで波長掃引スピードが数秒間で1オクターブと容易なので利用研究は極めて順調に進められている。

図11はFEL波長と発振スペクトル幅の関係について、実験データと(9)式との比較を示す⁴⁹⁾。図12に電子リニアックによる世界最短波長記録である278 nm-0.2 MW FEL スペクトルを示す。

(4) FEL のピークパワーと平均出力

FEL のピークパワーは、マイクロパルス (時間) 長当たりのFELエネルギーとして求められる。マイクロパルスFELエネルギーは、図7のパワーメータ又は図8のジュールメータで測定された平均出力をマイクロパルス数で割って求められる。マイクロパルス長はGaAs/AlGaAs多重超格子構造 (MQW) を用いた pump-probe 法 (赤外~遠赤外域) で約3 ps⁵³⁾、またはストリークカメラ (赤外~紫

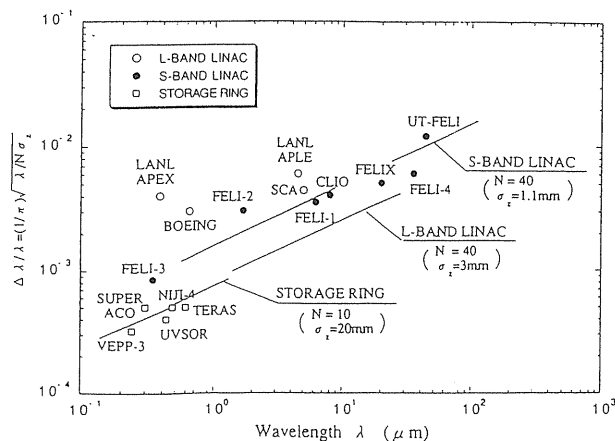


Figure 11. Relation between FEL spectral spread and FEL wavelength.

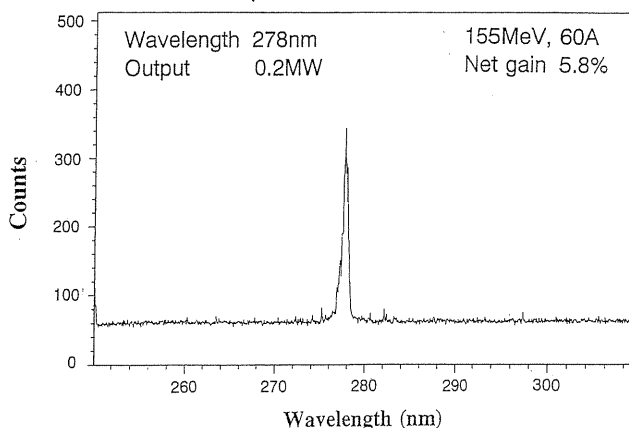


Figure 12. 278 nm FEL spectrum.

外域) で0.8~2.7 ps⁵⁴⁾と測定された。

表2にFEL装置1~4のFEL特性を示す。例えば、装置1のマイクロパルスFELエネルギーは30 μJ で、マイクロ

Table 2. Main parameters of FEL beam quality of the FELI four facilities

| FEL 装置 | 波長 (μm) | マイクロパルス・エネルギー (μJ) | パルス長 (ps) | ピークパワー (MW) | マクロパルス・パルス長 (μs) | 平均出力 (kW) |
|--------|----------------------|---------------------------------|-----------|-------------|-------------------------------|-----------|
| FEL-1 | 4.6~20 | 30 | 3 | 10 | 18 | 2.6 |
| FEL-2 | 1.8~3.3 | 6.4 | 3 | 2.1 | 12 | 0.57 |
| FEL-3 | 0.27~0.7 | 0.35~8 | 1.7 | 0.2~4.7 | 6 | 0.71 |
| FEL-4 | 18~40 | 4.2 | 3 | 1.3 | 8 | 0.42 |

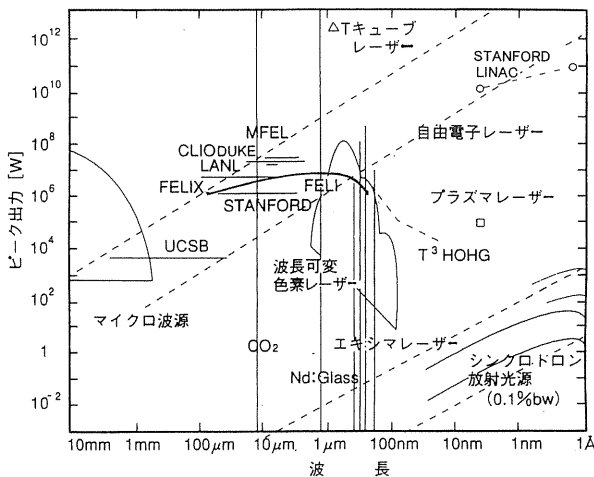


Figure 13. Peak powers available at FEL user facilities, conventional lasers and SR facilities. FELI: Free Electron Laser Research Institute, UCSB: Univ. of California (Santa Barbara), STANFORD: Stanford Univ., FELIX: FOM (The Netherlands), LANL: Los Alamos National Lab., CLIO: LURE (France), DUKE: Duke Univ., MFEL: Vanderbilt Univ., STANFORD LINAC: Stanford Univ. SLAC (planning).

パルス長は 3 ps なので、ピークパワーは 10 MW となる。平均出力は、マクロパルス（時間）長当たりの FEL エネルギーとして求められる。装置 1 のマクロパルス長は 18 μs なので、89.25 MHz 運転の場合マイクロパルス数は 1600 となり、平均出力は 2.6 kW となる。

図 13 に FEL 研 (FELI) の FEL 装置のピーク出力を国

外の利用研究施設の FEL や従来レーザー、シンクロトロン放射のピーク出力と比較した。

5. FEL 利用研究の現状— 特に FEL 研での利用研究

図 14 に FEL 研の利用研究施設の概略図を示す。4 実験室の他に、ビームモニター室、準備室、クリーンルーム空調室があり、約 400 m^2 ある。FEL はモニター室から伝送系を通して各実験室に分配される。利用実験室にはコンピュータが 2 台設置され、4.6~14 μm FEL を 0.1 mm 径に絞って照射できるので、外部利用者にも活用されている。図 15 は Prof. Madey (中央) とコンピュータを手にした筆者を示す。FEL 伝送用パイプは、実験室の天井近くに設置されていてモニター室から送られてくる。パイプ内の FEL ビームは数 cm 径なので、コンピュータとの接続部で数 mm 径の平行ビームにしてからコンピュータに導かれる。FEL は接続部とコンピュータの 11 枚の金コートミラーで伝送され ZnSe レンズで 0.1 mm 径に絞られる。FEL パワーは約 2/3 に減少するが、虫歯治療にはすぐ使用できる。1 台のコンピュータは脂肪酸と結合したコレステロールの分解実験に使用され⁵⁵⁾、他の 1 台は半導体応用に使用されている。

表 3 に FEL 研で進められている利用研究について、それぞれのテーマについて必要な FEL のピークパワー密度と波長を示した。ピークパワー密度は、照射された FEL のピークパワー P と 3 次元ビームプロファイルから求めら

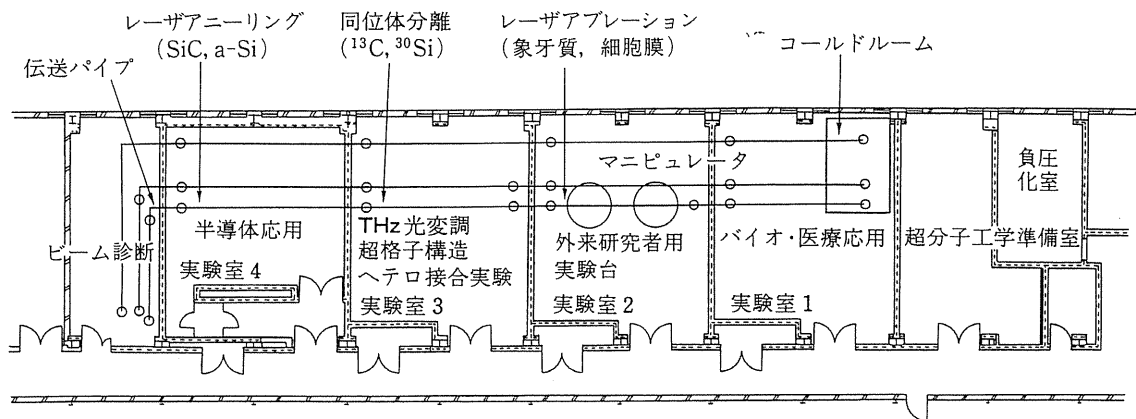


Figure 14. FEL user facilities of the FELI.



Figure 15. Manipulator installed at Lab. 2 of the FELI user facilities (center; Prof. John Madey).

Table 3. Proper peak power density and wavelength for research subjects performed at the FELI

| | | |
|---|---|-----------------------|
| ^{10}B , ^{13}C , ^{30}Si の同位体分離 | 10 GW/cm ² ~ 1 TW/cm ² | 9~11(μm) |
| 多層膜ミラーの損傷 | 10 GW/cm ² | 0.2~0.7 |
| 歯のアブレーション | 5 GW/cm ² | 9.4 |
| C ₆₀ 薄膜 (グラファイトのアブレーション) | 5 GW/cm ² | 10.6~12 |
| アブレーションの敷居エネルギー密度 | 5 GW/cm ² | 5~12 |
| 磷イオン注入ダイアのアニーリング | 2 GW/cm ² | 5.85 |
| a-Si:H の熔融 | 1 GW/cm ² | 7.85 |
| a-Si:H のアニーリング | 0.2 GW/cm ² | 7.85, 11.2 |
| a-SiC 中のキャリアー濃度制御 | 0.2 GW/cm ² | 10.4 |
| 幹細胞への遺伝子導入 | 0.1-0.4 GW/cm ² | 6.1 |
| 歯の表面改質 | 0.1 GW/cm ² | 9 |
| コレステロール・エステル分解 | 0.1 GW/cm ² | 5.75 |
| フォトダイナミックセラピー (PDT) | 50 MW/cm ² | 0.6~0.7 |
| 半導体ヘテロ接合の評価 | 1 MW/cm ² | 5~13 |
| 量子井戸構造を用いる光センサー | 1 MW/cm ² | 5~40 |
| 量子井戸構造による THz 光制御 | 0.3 MW/cm ² | 9~11 |

る。数 mm 径より太いビームは、32×32(50 mm×50 mm) 熱電対アレー (SPIRICON PYROCAM II and LBA-2000) で測定されるが、ビーム径がそれ以下の場合には正確な測定は困難になるので、アブレーションによるビームスポットを照射野とした。図16はアモルファス SiC のアニーリングに12.6 μm FEL を ZnSe レンズで絞って照射した後の光学顕微鏡観察像であり、FEL ビームが波長 λ の2倍に絞れることを示しており、ピークパワー密度 P_d はおおよそ次式で与えられる。

$$P_d = P / (\pi \lambda^2) \quad (10)$$

半導体ヘテロ接合の電位障壁測定は8~12 μm の FEL を用いて ZnSe/GaAs, GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs, ZnSe/AaAs, ZnMgSSe/GaAs, CdS/CdTe, InAs/AlSb について行った⁵⁹⁻⁶²。障壁高さは半導体の接合面での不連続なエネルギー変化量に相当し、それより大きなエネルギーの光を接合部に照射すると光電効果によって電子がたたき上げられ、光電流が発生する。これまでこの値を正確に決定する手段はなかったが、出力が安定していて波長掃引スピードが数秒間で1オクターブという速さの FEL を用いて初めて可能となった。FEL 研では ZnSe/GaAs 素子で、113 meV の測定結果を得ている。

京大(工)との量子井戸構造を用いたピコ秒パルス光制御光変調の実証実験では10.5 μm の FEL を用いており、光変調素子として GaAs の基板の上に AlGaAs と GaAs の薄膜を交互に成長させた量子井戸構造のものを用い、変調光として10.5 μm の FEL を、被変調光として Ti サファイアレーザ等を使用している。変調光の波長には井戸構造によって生じたサブバンド間に相当する波長の FEL が選ばれていて、素子当たり僅か 5 pJ の FEL エネルギー照射で (0.3 MW/cm²)、井戸構造のバンド間遷移による Ti サファイアレーザの吸収率変化によってピコ秒パルス光変調が可能になることを明らかにした⁶³⁻⁶⁶。FEL のマイクロ

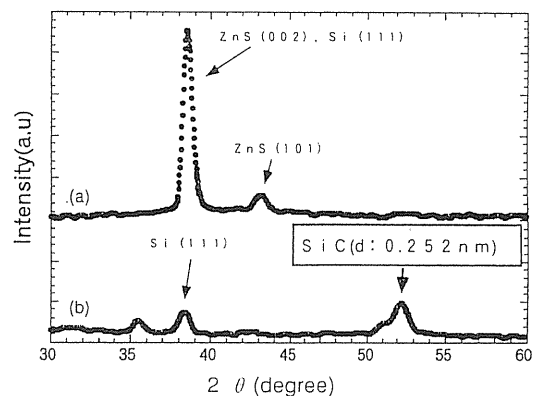
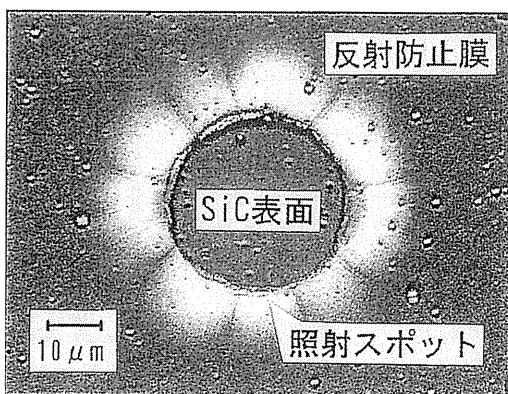


Figure 16. Left; Optical microscope image of a-SiC sample irradiated by 12.6- μm FEL. Right; X-ray diffractograms of (a) as-deposited and (b) irradiated a-SiC. The deposited sample is covered with a ZnS film⁵⁶⁻⁵⁸.

バンド長の測定にも役立つ GaAs/AlGaAs の MQW (Multiple Quantum Wells) を用いた光制御光変調の実証実験データを図17に示す。

アモルファス半導体のアニーリングでは、SiC には $12.6 \mu\text{m}$, a-Si:H には $11.2 \mu\text{m}$ の FEL を照射してアニーリング効果を調べており、SiC の結晶化についてはすでに述べた。いずれの実験でも分子結合の伸縮振動に共鳴する FEL の波長が選ばれている。大阪府立大 (総) との a-Si:H のアニーリングや溶融には $7.85 \mu\text{m}$ の FEL が用いられ、大気中での溶融により $2 \mu\text{m}$ 径の Si マイクロファイバーが生成すること、そしてファイバー中に 5 nm 径の Si 結晶が生成することを見出し、その量子ドット特性を明らかにした⁶⁷⁻⁶⁹⁾。

N イオンを注入した 6H-SiC の $10.4 \mu\text{m}$ FEL アニーリングではキャリア濃度を $1 \times 10^{17} (\text{cm}^{-3})$ 近くまで1桁向上させた⁷⁰⁾。住友電気工業(株)との P イオン注入ダイヤモンドのアニーリングでは $5.85 \mu\text{m}$ FEL の 2 GW/cm^2 照射で n 型半導体ダイヤモンドの生成に成功している⁷¹⁾。ラマン・スペクトロスコーピーによるアニーリングや脂肪酸コレステロール分解の評価も大阪府立大 (総) との共同研究で行われた⁷²⁾。

分子結合の伸縮振動共鳴と多光子吸収解離による C や Si, B の同位体分離も行われた。京都工繊大との C や Si の同位体分離には、フロンガス系の CHBrF₂ には $9.7 \mu\text{m}$ FEL を照射し、¹³C 濃度が天然存在比 1% から 6% に増加した^{73,74)}。FEL による同位体分離はアメリカの Duke 大学でも始められたばかりで、³⁰Si の分離には約 300 mW の $9 \sim 10 \mu\text{m}$ FEL を分光器に通してスペクトル幅を 0.2% 以下に改善するようにしている。(株)レーザー総研との ¹⁰B の分離では約 30% の分離に成功している⁷⁵⁾。

グラファイトのアブレーションによる C₆₀ フィルムの生

成や氷状アセトンのアブレーションによる C₆₀ 結晶の生成の研究も豊橋技術科学大と行った⁷⁶⁾。

FEL のバイオ・医療応用への利用でも中赤外域 FEL によるアブレーションやショック波の効果が活用されている。FEL による虫歯の切削は、オランダの FELIX と FEL 研でしか報告されていないが、エナメル質に含まれるハイドロキシアパタイト Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂ の磷酸基 (-PO₄) の伸縮振動が $9.4 \mu\text{m}$ FEL に共鳴してアブレーションを起こすとされている^{77,78)}。水は $3 \mu\text{m}$, $6.2 \mu\text{m}$ の FEL もよく吸収するので、最近 $3 \mu\text{m}$ のエルビウム・ヤグレーザによる熱吸収を利用して虫歯削りも行われている。しかし、 $3 \mu\text{m}$, $6 \sim 7 \mu\text{m}$ の吸収ピークに比べて $9 \mu\text{m}$ の吸収が極めて大きいので、FEL 研では $9 \sim 9.6 \mu\text{m}$ FEL の虫歯照射効果を研究している。将来、この波長域のレーザーをマニピュレーターで照射し、虫歯治療ができるようになれば、ドリルによる虫歯削りの恐怖から解放され、また人の歯はアモルファス状のハイドロキシアパタイトなので、アニーリングによる歯の改質も期待されている⁷⁹⁾。

リンパ球や赤血球などを創り出す造血系細胞の大本である幹細胞への遺伝子導入も $6.1 \mu\text{m}$ FEL ショック波を用いて試みている。実験では $6.1 \mu\text{m}$ FEL 照射により PGFP 遺伝子を Molt-4 細胞に導入する実験はすでに成功している⁸⁰⁻⁸²⁾。RAG-2 遺伝子が欠落した RAG-2 マウスと呼ばれるマウスの幹細胞への RAG-2 遺伝子の導入を試みている。免疫不全症が治癒することを検証する。これらは、FEL の波長可変性とピコ秒パルスによって生ずるショック波特性を利用するもので、遺伝子のほかに薬物の細胞内導入の実験が行われている⁸³⁾。

可視-紫外域 FEL の利用については、皮膚を傷つけずにガン治療ができるフォトダイナミックセラピー (photodynamic therapy, PDT) の研究が行われた。これは、

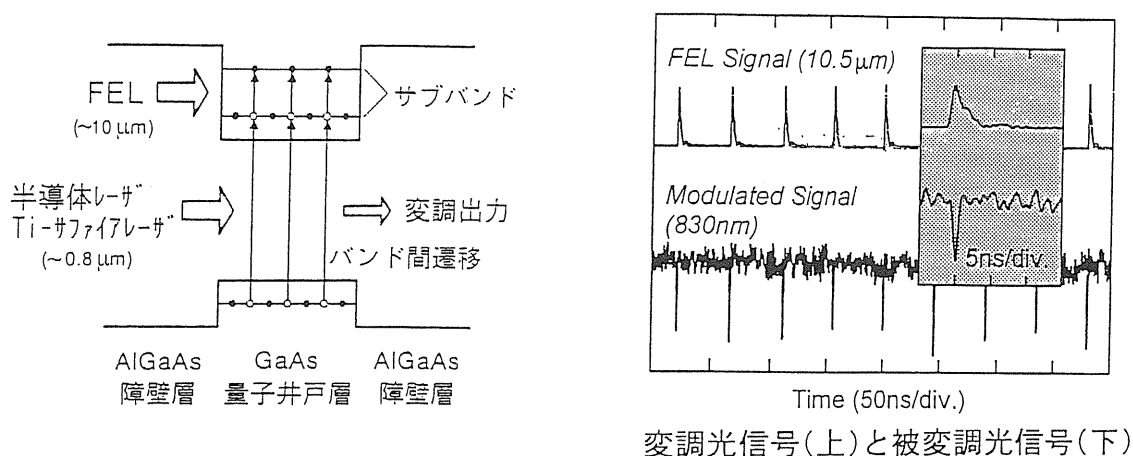


Figure 17. Left; Band diagram illustrating the principle of all-optical modulation based on the intersubband transition in n-doped quantum wells. Right; Typical all-optical modulation results: (a) FEL micropulse light (ISB-resonant light) at a wavelength of 10.5 and (b) the corresponding modulated signal (IB-resonant light) scaled in modulation depth. Here, the modulation depth is defined as a ratio of the signal height to the unmodulated level.

0.65~0.7 μm の赤い光がわずかだけれど人体にしみ込むのを利用する。皮膚近くにできたガンの場合、赤色レーザーに反応してガン細胞を殺す薬をガンに集めて、体外からガンに赤色レーザーを照射する。FELの最適波長の選択と皮膚の表面を痛めないという極短パルス特性を生かせるかが課題である。

遺伝子導入では京大胸部疾患研や大阪医科大、脂肪酸コレステロールの分解では東京医科大、PDTの研究は福井医科大との協力研究で行われたことを記しておきたい。

6. FEL 装置開発と利用研究の展望

(1) FEL 発生用電子リニアックを SR 光源電子入射器に

在来レーザーが発明されて数年で実用機が続出したのと比べると実用機8台は少なすぎる。この差は在来レーザーでは光学材料が揃えば1人でどこでも作れるように安価で容易で場所をとらないのに対して、最も利用分野が広そうな数 μm FEL 装置でも高価(数億円)で難しく場所をとるところにある。

しかし、数 μm FEL 装置の主要部である低エミッタンスの数+MeV リニアックを蓄積リングの入射器として、また陽電子発生用として、多目的に利用する場合を考えると FEL 発生の魅力は大変大きくなる。新しく光源を建設する場合には是非 FEL 発生可能な電子入射器を採用して欲しい。古い SR 施設でもダレスプリーの SRS (2 GeV)、ルンドの MAX (0.56 GeV) で、新しい入射器としてマイクロトロンから電子リニアックへの更新を検討中である。

(2) 小型遠赤外 FEL 装置の開発

波長域100 μm 前後に限れば、スタンフォード大学で開発された小型 FIR-FEL 装置のように1億円で建設が可能である⁸⁴⁾。この装置は、学位論文用に試作されたもので1.5 \times 2 m² と小型で、1空洞半の2856 MHz 加速空洞をもつ熱陰極型 RF 電子銃を用いて1~3 MeV の電子ビームを加速し、50 cm 長のヘリカルアンジュレーター ($\lambda_u=1$ cm) で100~1000 μm の FEL を発生できる。ピーク出力は0.33 MW、マクロパルス幅3 μs 、10 Hz で平均0.3 W とされている。用途は THz (テラヘルツ) プローブとして超格子構造、トンネル共鳴現象、高温超伝導体の解明に役立つが、完成後2年以上経ても利用研究成果の報告はない。

(3) 大出力-FEL 装置の開発と利用

中赤外~紫外域の大出力 FEL 装置としては、米国には Durham にある Duke Univ. の1 GeV ring FEL 装置と、Newport News にある Jefferson National Accelerator Facility (CEBAF) の recirculator FEL 装置がある。Duke FEL 装置は50 W の0.15 μm FEL を1995年に発振する予定で1990年頃から建設されたが、1996年11月に

0.35 μm で、1998年8月に0.217 μm で発振したが、予期したピーク電流が得られず大出力は得られていない⁸⁵⁾。計画は大幅に遅れている。

CEBAF FEL 装置では、600 M\$ をかけて200 MeV 超伝導リニアックを建設し、0.2~6.6 μm 波長域で平均出力1 kW を出そうという計画が進行中である⁸⁶⁾。1998年5月には42 MeV ビームで平均300 W の赤外域 FEL 発振に成功し⁸⁷⁾、6月から10企業と8大学が利用実験を始める予定で600 m² の利用実験室が用意された。しかし、電子銃にフォトカソード電子銃を採用したため寿命が約1週間と短く11月まで利用研究は行われていない⁸⁸⁾。CEBAF では Recirculator で大電流バンチを得ようとしているが、Ring とでバンチ当たりのピーク電流にどれだけ差がでるか興味あるところである。

最近の計画として中赤外~紫外域 FEL を地球環境診断用レーザーライダーに利用する計画が John Madey とハワイ大のグループによって提案されている⁸⁹⁾。FEL 装置を船に載せ、赤外~紫外域 FEL は大気を、可視~紫外域 FEL で海水を診断する計画である。

一方、ロシアの Novosibirsk にあるブドカー原子核物理研究所では、平均電流100 mA の35 MeV レーストラック型マイクロトロンを建設中で、平均10 kW 以上の数 μm FEL を発生させて多光子吸収による化学反応の研究を予定している⁹⁰⁾。レーザー発振に使用された電子ビームのエネルギーは180 MHz RF で回収し、電子ビームによる放射化を抑え、放射線遮蔽を軽減できるとされている。

(4) 赤外~サブミリ波域のセンサー開発

FEL は広い波長域で連続可変であり、在来レーザーのないミリ波から近赤外域の空白を埋めるレーザーである。FEL 波長掃引スピードは数秒間で1オクターブと在来レーザーでは考えられない速さであり、立ち遅れた赤外~サブミリ波域のセンサー開発では、MQW をセンサーに用いる研究が大阪大(工)や東京大生産研のグループによって進められている^{91,92)}。赤外~サブミリ波域のセンサー開発では、中赤外域(2~20 μm)で超格子(量子井戸)光伝導を利用する高速センサー、遠赤外域(20~200 μm)からサブミリ波では検波型で薄膜アンテナ結合型センサーの開発が望ましい。

(5) 赤外域 FEL によるバイオ・医療を含めた産業応用

電子リニアック FEL は、パルス長がピコ秒で、ピーク出力が MW、波長掃引速度も1オクターブ数秒で波長可変という新しい特性を備えているので、アブレーション、超音波効果やショック波効果を利用したバイオ・医療も含めて FEL による産業応用の研究が可能になる。米国ナッシュビルにあるバンダピルト大の Medical FEL Center (MFEL) では、1998年9月に大企業の支援を得て赤外域 FEL (Mark III) によるバイオ・医療センター(約2000

m²) を開設している⁹³⁾。今後の発展が期待されている。

参考文献

- 1) J. M. J. Madey: *J. Appl. Phys.* **42**, 1906 (1971).
- 2) H. Motz: *J. Appl. Phys.* **22**, 529 (1951).
- 3) H. Motz and M. Nakamura: *Annal of Physics* **7**, 84 (1959).
- 4) 富増多喜夫: 入門自由電子レーザー [日本原子力学会編, 1995], 1章と4章.
- 5) D. A. G. Deacon, et al.: *Phys. Rev. Lett.* **38**, 892 (1977).
- 6) T. Tomimasu, et al.: *Phys. Rev.* **B10**, 2669 (1974).
- 7) T. Tomimasu: *Nucl. Sci. Applications* **3**, 29-54 (1987).
- 8) 近藤 淳: 電子技術総合研究所調査報告200号 (1979).
- 9) 三間 啓興: *日本物理学会誌* **37**, 906 (1982).
- 10) 川崎 温 他: 「自由電子レーザーの実験的研究」成果報告書, 金沢大学理学部 (1983, 11).
- 11) T. Tomimasu: *Rev. Sci. Instr.* **63**, 722 (1992).
- 12) T. Tomimasu, et al.: *Pro. 7th Symposium on Accelerator Science and Technology*, Osaka University, 1989, p. 347.
- 13) H. Ohgaki, et al.: *ibid.* p. 284.
- 14) M. Yokoyama, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A331**, ABS34 (1993).
- 15) 山田家利勝, 山崎鉄夫: 朝日新聞, 1998年11月4日夕刊科学欄.
- 16) M. Billardon, et al.: *Phys. Rev. Lett.* **51**, 1652 (1983).
- 17) S. V. Benson, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A272**, 22 (1988).
- 18) V. N. Litvinenko, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A375**, 46 (1996).
- 19) J. A. Edighoffer, et al.: *Appl. Phys. Lett.* **52**, 1569 (1988).
- 20) R. Warren: *Star Wars and the FEL*, Los Alamos National Laboratory (1995).
- 21) R. Warren, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A259**, 8 (1987).
- 22) D. H. Dowell, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A318**, 74 (1992).
- 23) S. J. Allen, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A358**, 536 (1995).
- 24) H. A. Schwettman, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A375**, 632 (1996).
- 25) C. A. Brau, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A341**, ABS21 (1996).
- 26) S. Benson, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A296**, 110 (1990).
- 27) D. Oepts, et al.: *Infrared Phys. Tech.* **36**, 297 (1996).
- 28) J. M. Ortega, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A375**, 618 (1996).
- 29) T. Tomimasu, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A375**, 626 (1996).
- 30) H. A. Schwettman and T. Tomimasu (Editors): *Free Electron Laser Facilities and Applications*, *Nucl. Instr. Meth.* **B144**, pp. 1-268 (1998).
- 31) 富増多喜夫他: *日本原子力学会誌* **33**(7), 682 (1991).
- 32) T. Yamazaki, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A309**, 343 (1991).
- 33) S. Takano, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A331**, 20 (1993).
- 34) T. Yamazaki, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A331**, 27 (1993).
- 35) E. Nishimura, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A341**, 39 (1994).
- 36) S. Okuda, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A358**, 244 (1995).
- 37) T. Haga, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A393**, 193 (1997).
- 38) E. Minehara, et al.: to be published in *Nucl. Instr. Meth.* **A**.
- 39) T. Tomimasu, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A407**, 370 (1998).
- 40) Y. Morii, et al.: *Proc. 9th Symposium on Accelerator Science and Technology*, KEK, 25-27 August, 1993, p. 225.
- 41) S. Abe, et al.: *Proc. 19th Linear accelerator Meeting in Japan*, JAERI, 20-22 July 1994, p. 225.
- 42) E. Oshita, et al.: *IEEE Proc. PAC '95 (DALLAS)*, May 1-5, 1995) p. 1608.
- 43) K. Saeki, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A358**, ABS56 (1995).
- 44) Y. Miyauchi, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A375**, ABS42 (1996).
- 45) T. Tomimasu, et al.: *IEEE Proc. PAC '95 (DALLAS)*, May 1-5, 1995) p. 257.
- 46) A. Kobayashi, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A375**, 317 (1996).
- 47) T. Tomimasu, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A383**, 337 (1996).
- 48) T. Tomimasu, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A393**, 188 (1997).
- 49) T. Tomimasu, et al.: *CP413, Towards X-Ray Free Electron Lasers*, edited by R. Bonifacio and W. A. Barletta, 1997 AIP pp. 127-141.
- 50) T. Tomimasu, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **B144**, 1 (1998).
- 51) S. Okuma, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A375**, 654 (1996).
- 52) M. Yasumoto, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **B144**, 176 (1998).
- 53) T. Suzuki, et al.: *Appl. Phys. Lett.* **69**, 4136 (1996).
- 54) K. Wakita, et al.: *Proc. AFEL '97 (FELI, Hirakata, Jan. 21-24, 1997)* pp. 87-90.
- 55) K. Awazu, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **B144**, 225 (1998).
- 56) H. Ohyama, et al.: *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, L683 (1997).
- 57) H. Ohyama, et al.: *J. Electronic Materials* **26**(3), 183 (1997).
- 58) H. Ohyama, et al.: *Appl. Phys. Lett.* **71**(6), 826 (1997).
- 59) K. Nishi, et al.: *Jpn. J. Appl. Phys.* **35** (1996) L760.
- 60) K. Nishi, et al.: *Appl. Phys. Lett.* **70**(16), 2171 (1997).
- 61) K. Nishi, et al.: *Appl. Phys. Lett.* **70**(26), 3585 (1997).
- 62) K. Nishi, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **B144**, 107 (1998).
- 63) T. Suzuki, et al.: *Appl. Phys. Lett.* **69**(27), 4136 (1996).
- 64) T. Mitsuyu, et al.: *Proc. IEEE Lasers and Electro-Optics Society 1996 Annual Meeting*, MN4.
- 65) 三露常男, 富増多喜夫: *応用物理* **66**(2), 137 (1997).
- 66) T. Asano, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A144**, 123 (1998).
- 67) Y. Maeda, et al.: *Proc. AFEL '97 (FELI, Hirakata, Jan. 21-24, 1997)* p. 307.
- 68) Y. Maeda, et al.: *Material Chemistry and Physics* **54**, 164 (1998).
- 69) Y. Maeda, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **B144**, 152 (1998).
- 70) H. Ohyama, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **B144**, 135 (1998).
- 71) S. Ogino, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **B144**, 181 (1998).
- 72) Y. Fukami, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **B144**, 236 (1998).
- 73) S. Kuribayashi, et al.: *Appl. Phys.* **B65**, 393 (1997).
- 74) S. Arai, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **B144**, 193 (1998).
- 75) Y. Izawa, et al.: Presented at FEL '98 Conference (CEBAF, Aug. 17-22, 1998).
- 76) M. Okoshi, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **B144**, 147 (1998).
- 77) S. Ogino, et al.: *SPIE* **2922**, 194 (1997).
- 78) S. Ogino, et al.: *SPIE* **2973**, 29 (1997).
- 79) S. Ogino, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **B144**, 236 (1998).
- 80) E. Nishimura, et al.: *Proc. AFEL '97 (FELI, Hirakata, Jan. 21-24, 1997)* p. 271.
- 81) E. Nishimura, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A407**, 500 (1998).
- 82) M. Yasumoto, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A387**, 459 (1997).
- 83) K. Awazu, et al.: *SPIE* **2681**, 167 (1996).
- 84) J. W. Lewellen: *Nucl. Instr. Meth.* **A358**, 24 (1995).
- 85) V. N. Litvinenko, et al.: Presented at FEL '98 Conference (CEBAF, Aug. 17-22, 1998).
- 86) G. R. Neil, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A318**, 2121 (1992).
- 87) S. Benson, et al.: Presented at FEL '98 Conference (CEBAF, Aug. 17-22, 1998).
- 88) S. Benson: private communication (Nov. 1998).
- 89) R. J. Burke, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **B144**, 99 (1998).
- 90) N. G. Gavrilov, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **A304**, 228 (1991).
- 91) H. Nakano, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **B144**, 160 (1998).
- 92) Y. Shimada, et al.: *Nucl. Instr. Meth.* **B144**, 166 (1998).
- 93) G. Edwards: private communication (Aug. 1998).