## 研究課題名:自由電子レーザー(FEL)の開発

研究代表者:早川 建 (日本大学量子科学研究所)

研究従事者:田中 俊成、早川 恭史、横山 和枝、森 啓、野上 杏子、 境 武志 (日本大学量子科学研究所)

> 菅野 浩一、石渡謙一郎、中尾 圭佐、猪川 弘康、中村 吉宏、 橋本 英子、藤岡 一雅、村上 琢哉、長谷川 崇、宮崎 慎也、 稲垣 学、城所 明生、高崎 寛 (日本大学大学院理工学研究科量 子理工学専攻)

## 【研究目的】

本施設の自由電子レーザー(FEL)は2001年5月に発振を実現した。しかし当時は電子ビームが不 安定で、その特性を調べることも容易ではなかった。その後加速器の改良によって、電子ビームが安定 になり、これに伴って、FELの出力も安定になったため、その特性、電子ビームのパラメーターとの相関 などを測定することが可能になった。

本研究は、FEL 光の特性の解析と出力の安定化・高度化を目的とする。

FEL の特性を調べるために、発振波長領域、スペクトル、パルス長、パワーを測定した。また、加速器 から入射される電子ビームの電流密度が大きいことを反映して発生した、自発放射増幅(Self Amplified Spontaneous Emission: SASE)について報告する。

FEL 安定化のためには電子ビームの安定化すなわち電子加速器の安定化が必要なことは当然であるが、FEL 発生装置自身に起因する不安定性も存在する。代表的な不安定要因として、以下のような項目がある。

1. FEL 発生装置の機械的振動現象

FEL 発生装置は、光共振器とアンジュレータからなる。光共振器のミラー間隔はその間を 往復する光の往復周期が、電子を加速するマイクロ波の周期の整数倍になっていなければなら ない。許容誤差は、およそ7mのミラー間隔に対して、FELの波長程度、すなわち、1~5μm である。ところが、ミラー架台の剛性が足らず、FEL 発生装置周辺の機器を冷却するための冷 却水を循環させると、これと同程度の振幅で振動することが明らかとなった。

2. FEL 光の照射による光学系の損傷。

加速器の高度化が進み、FELの出力が増大するのに伴って、光共振器を構成するミラーが短期間で損傷を受けるようになった。また、FELを光共振器から取り出すビームラインのミラー も損傷を受けていることが明らかとなった。

## 【研究概要】

電子加速器高度化の努力によって、自由電子レーザーは応用実験に利用できる程度の、安定性と 大出力化を実現した。以下に本施設の自由電子レーザーの特性と問題点について報告する。

#### 発振波長領域

FELの特長は、波長の連続可変性にあるが、主に加速器の性能とアンジュレーターの特性によって使用可能領域が限定される。本施設の場合、近赤外領域(1~5 µ m)で発振するように設計され

ている。これを確認する実験を行った。この結果、0.87μmから6μmの間で発振が確認された。しかし、短波長側は利得が小さいため、非常に不安定で、出力パワーも小さい。実用的な安定性とパワ ーレベルが得られるのは1.2μm以上の波長領域であった。近い将来、最大加速エネルギーを上げる 予定なので、これが実現すれば、もう少し利得の大きい条件で発振させることができ、1μm以下の 波長まで、実用に供せられるようになると思われる。

## スペクトル

スペクトルの測定はグレーティングを装着したモノクロメーターを用いて行った。しかし、パルス 毎にスペクトルが変化するため、波長を掃引する方法では正確な測定はできない。パルス毎のスペクト ルを測定するため、焦点面にイメージングディバイスを置いて、そのディバイスの大きさで決まる波長 範囲の分光強度を測定した。この波長領域で使用できるディバイスとして、InGaAs ダイオードアレイを 採用した。この検出器は 0.9~1.7 µ m の間で感度を持つ。測定は波長 1.5 µ m近傍で行い、スペクトルの 半値全幅として 0.9~1%を得た。

#### パルス長

光パルスのミクロパルス長を直接測定する手段としては、ストリークカメラを使う方法があるが、 現時点で実用化されているものでは、当施設のFELに対しては分解能がたりない。これに代わる方 法として、FELのコヒーレント性を利用して干渉計を用いた測定を行った。マイケルソン型の干渉 計を組み立て、波長1.5µmで測定した。この波長を選んだのは、これより長い波長では適当なハー フミラーが入手できなかったからである。干渉パターンの測定から導かれるパルス長(半値全幅) はおよそ70µmであった。このパルス長で決まるスペクトルは半値全幅でおよそ1%となり、スペ クトルの直接測定の結果とよく一致している。この時、同時に2次及び3次の非線形高調波の干渉 も観測された。高調波の状態は電子ビームと光共振器の調整によって大きく変化するが、パルス長 は概ね、基本波の1/3乃至1/2であった。

#### パワー

FEL パワーの測定は実用上重要である。市販のパワーメータを使い、マクロパルス毎のエネルギーを測定した。FEL のマクロパルスはおよそ 10 µ sec 程度の幅を持ち、この中に、前述のパルス長を 測定したミクロパルスが 350psec 間隔で並んでいる。出力は波長によって異なり、波長 2 µ m 前後が 最も大きく、60~70mA の電子ビーム電流に対して 20mJ 程度のエネルギーが得られる。これより 波長が長くなっても短くなっても FEL 光のエネルギーは減少する。この電子ビームの条件では短波 長側は 1 µ m、長波長側は 6 µ m を超えると、発振しても出力は 1mJ 以下である。電子ビーム電流 を増加させれば出力もそれに伴って増加するが、これ以上の出力増加は後述するような光学系の損 傷の懸念があるため、系統的な測定は未だ行っていない。

マクロパルスあたりのエネルギーと、パルス長の値から、例えば 20mJ 出力の時、パルスの先頭出 力はおよそ6 MW になる。出力されるのは光共振器に蓄えらたパワーの 1%程度であるから、光共 振器内部の尖頭パワーは 600MW にもなる。

#### SASE の観測

FEL を発振させるための調整を行っている時に、自発放射光の強度が 10 倍以上に増幅される現

象が見られた。光共振器を完全に同調からはずした状態でも観測されることから、通常の FEL の発振とは異なり、シングルパスで発現する現象である。この光もコヒーレンシーを持っているので、 FEL の一種であり、アンジュレーターが十分長ければ、飽和に至る。X 占領域では有効な光共振器が構成できないので、長尺のアンジュレーターとこの現象によって、FEL を実現しようとしている。 通常の運転では、運動量分析系を利用したバンチ圧縮によって、電子ビームの尖頭電流を増大させ、 FEL の発振に導いている。SASE は充分大きな電流でなければ発現しない現象であることから、バンチ圧縮機構が有効に働いていることを裏付けている。

## FEL 共振器ミラーの機械的振動

共振器の途中にハーフミラーを挿入すると、外部からレーザー光を導入することができ、FELの 取り出しビームラインから観測することができる。この光には共振器の中を往復した光が混ざって いるため、ミラー間隔に依存した干渉が現れる。この干渉の観測から、ミラー間隔は常に変動してお り、屋外の整地作業用の機器使用なども影響することが明らかとなった。特に問題となったのは、 FEL 発生装置と同じ室内にある電磁石、ビームダンプなどの冷却水の影響で、冷却水を循環させる と、ミラー間隔の変動が激しくなった。ミラー間隔の変動を定量的に測定するために、レーザー測 距機を設置した。

加速器運転時は放射線によって、測定器が破損してしまうため、長期停止期間を利用して測定した。 レーザー測距機の分解能は 20nm で、この測定には十分であった。ミラー自身は真空容器の中にあ るため、直接測定できないので、この真空容器の動きを測定した。測定の結果、冷却水を循環させ ている時は、数100nmの振幅で、振動していることが明らかとなった。この程度の振動でも、FEL の発振状態に影響を与え、特に短波長領域では深刻な影響を与えているものと考えられる。このよ うな問題が発生するのはミラーとその駆動機構の付属した真空容器の架台の剛性が不足している ためである。この架台は幅 45mm、厚さ 5mm の L 字型アングルによって構成されている。剛性を 増すために、側面に厚さ6mmの鉄板を取り付け、L字型アングルの鎹によって補強した。この結果、 冷却水が循環している時でも、振幅は 20nm 程度となり、FEL の発振状態への影響は除去されたと考 えられる。ただ、内部まで充填された架台と比較すると構造上、温度変化による歪は大きい。この 歪はミラー間隔とアラインメントを変化させ、発振状態に影響を与える。しかし、ゆっくりした変動 であるため、調整によって、発振状態を維持することが可能である。また、空調を入れると、室温 が30分程度の周期で、±1度位変動するので、使用を中止している。空調を使わない場合、温度変化 は1日あたり0.1度程度である。しかし、その場合、室温は季節ごとに変化するし、長時間の連続運 転には対応できないので、本質的な解決にはなっていない。また、 室温は精密な温度制御のできる 空調機を導入すれば、十分な精度で一定にできるが、キャビティー間隔を変えるのは室温ばかりで なく、床の伸び縮みも影響するし、建物全体の歪も影響する。建物は外界に接しているので、その 影響を排除することはほぼ不可能である。ミラー間隔と、ミラーの向きの調整はこの意味で不可欠 である。現在、ミラーの自動調節機構を開発中である。

## FEL の発振と光学系の損傷

FELの発振実験の初期には、発振にかかわる多くのパラメーターが不明であった。特に、電子ビームの先頭電流は、バンチ長の測定方法が確立していなかったため、はっきりしなかった。FELはもともと、利得の小さい発信現象なので、発振を確認するまではできる限り光共振器によるロスを

小さくしなければならなかった。鏡の反射率がもっとも大きいのは、現在知られている限り、誘電体多層膜を使用したもので、帯域幅は狭いながら、ほぼ 100%の反射率を達成できる。原理的にはどのような波長領域でも作成可能であるが、反射率の確認方法の限界などから、普通に入手できるのは長波長側では 1.5 µm 程度までであった。そこで、中心波長 1.5 µm、反射率 99.5%の誘電体多層膜 ミラーを製作し、実験に用いた。

発振を実現した当初は、加速器が不安定であり、発振レベルがあまり高くなかったこともあって、 鏡に異常が見られる事は無かった。しかし、次第に加速器が安定し、アンジュレータのギャップ間 隔も狭くできるようになったため、利得が向上し、発振レベルも高くなっていった。発振レベルの向 上に従って、鏡の反射率が低下して見えるような現象が現れ始めた。具体的には、電子パルスが終了 すると光のパルスは光共振器のロスで決まる時定数で減衰してゆくのだが、この時定数が次第に短 くなっていったのである。鏡に異状が生じていることは明らかだったので、真空容器を開けて、鏡を 取り出して観測した。鏡の中心付近の表面に、紙魚のような斑点が見られた。この斑点は大小あり、 最大のものは直径 0.3mm 程度であった。顕微鏡で観測すると、これは半球状の窪みで、一部溶けた ような痕跡も見られた。元々、誘電体層に傷やほこりの付着などが在ったところに、FEL 光が当た り、熱が発生して、誘電体が一部蒸発したものと考えられる。

FEL は波長が連続化変なことが特長なので、発振が確認された後は狭帯域な誘電体多層膜鏡では なく、赤外域で反射率の高い金をコーティングした鏡を使用した。光共振器からの光の取り出しは、 一方のミラーの中心に穿った穴を通して行う。石英基盤に金をコーティングしたミラーを使用した が、このミラーは FEL の照射によってごく短期間で、コーティング層が剥離してしまった。誘電体多 層膜ミラーも金コートミラーも基盤に石英を使用していたので、強力な FEL の照射によって、表面 で熱が発生し、熱伝導速度も小さいので高温になり、コーティング層に損傷を与えると考えられる。

石英基盤のミラーは熱伝導速度が小さく、局所的に高温が発生し、コーティング層をいためると 考えられたので、銅を基盤にしたミラーを製作した。銅の基盤に銀をコーティングし、その上に保護 膜をつけたもので、可視から赤外にかけて良好な反射率を持つ。このミラーはすぐに劣化すること はなかったが、やはり徐々に反射率が低下していった。このミラーを取り出して観察したところ、中 心部分が変色しており、一部銅の地肌が露出している個所もあった。特に、光を取り出すための穴 の周囲の損傷が著しく、地肌が露出し、溶けているようにも見えた。

現時点では、光共振器ミラーで一年以上の長期使用に耐えるものは見つかっていない。半年に1 度くらいのサイクルで交換せざるを得ないようである。

FEL 光は光共振器ミラーの中心に開けられた穴を介して取り出されるが、穴を抜けた後、210mm ほど下流に置かれた平面鏡によって反射され、補償光学系に導かれる。この平面鏡は研磨した光学 ガラスの表面にアルミニュームをコーティングしたものである。この点における FEL 光のスポット サイズは例えば波長 2µmの光に対して直径 3mm 程度である。この程度のスポットサイズでは未 だ、充分エネルギー密度が大きいのか、徐々に反射率が低下している。この鏡は金属基盤のものに交 換する予定である。

## 【まとめ】

電子加速器と光共振器の安定化の結果、波長 1.2~6 µmの領域で、安定な光を供給することがで きるようになった。出力が最大になるのは波長 2 µm 近傍で、1 マクロパルス当たり、およそ 20mJ である。出力をさらに増加させることは電子ビームの電流を増加させることにより、可能であるが、 光学系の耐力に問題があるため、現状はこのレベルで運用している。この問題が解決されれば、もっ と大きな出力の光を供給することができるようになる。電子ビームのバンチ圧縮を行って発振を実 現しているため、電子ビームのバンチ長は非常に短い。この結果、FEL 光のバンチ長も短くなり、 現状では半値全幅でおよそ 70 µm、時間幅にすると 230 fsec である。このパルス長で決まるスペク トルは波長 1.5 µm の時、約 1%で、これより波長の長い領域では概ね波長に比例してスペクトル幅 は広がり、波長の短い領域では狭まる。FEL の尖頭出力は 3 MW、光狂信器内に蓄積されパワーは 600 MW 程度になっているようである。

## 【研究業績等】

## ・発表論文

- K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, Y.Matsubara, K.Sato, I.Sato, H.Nakazawa, K.Yokoyama, T.Sakai, K.Kanno, K.Ishiwata, H.Inokawa and Y.Nakamura: Construction of the Infrared Undulator at LEBRA. Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan (2000.7)56-58.
- (2) Y.Hayakawa, I.Sato, K.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Matsubara, H.Nakazawa, K.Yokoyama, K.Kanno, T.Sakai, K.Ishiwata, H.Inokawa and Y.Nakamura: Observation of IR Spontaneous Radiation at LEBRA. Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan (2000.7) 358-360.
- (3) E.Hashimoto, K.Fujioka, T.Murakami, K.Nakao, I.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, K.Sato, H.Nakazawa, K.Yokoyama, K.Kanno, T.Sakai, K.Ishiwata, H.Inokawa and Y.Nakamura: FEL ビームのための補償光学システム. Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan (2001.8) 243-245.
- (4) T.Tanaka, K.Hayakawa, Y.Hayakawa, I.Sato, K.Yokoyama, K.Kanno, T.Sakai, K.Ishiwata, H.Inokawa and Y.Nakamura: アンジュレーター光による FEL ビームラインのビーム診断. Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan (2001.8) 246-248.
- (5) Y.Hayakawa, I.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, H.Nakazawa, K.Yokoyama, K.Kanno, T.Sakai, K.Ishiwata, A.Enomoto, S.Fukuda, S.Ohsawa, K.Tsuchiya and M.Kato: First Lasing of LEBRA FEL in Nihon University at a wavelength of 1.5 μm. Proceedings of the 23rd International Free Electron Laser Conference and 8th FEL User's Workshop (Darmstadt, Germany 2001.8), Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A483(2002) 29-33.
- (6) K.Kanno, Y.Hayakawa, I.Sato, K.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, H.Nakazawa, K.Yokoyama, T.Sakai, K.Ishiwata, H.Inokawa and Y.Nakamura: Present Status of the Near-IR FEL at LEBRA in Nihon University. Proceedings of the 23rd International Free Electron Laser Conference and 8th FEL User's Workshop (Darmstadt, Germany 2001.8) II23-24.
- (7) T.Tanaka, I.Sato, K.Sato, K.Hayakawa, Y.Hayakawa: Status of Infrared Free Electron Laser at Nihon University. Jpn. J. Appl. Phys. 41 Suppl. 41-1 (2002) 34-40.
- (8) Y.Hayakawa, I.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, K.Yokoyama, T.Sakai, K.Kanno, K.Ishiwata, E.Hashimoto: Simultaneous Measurement of the Fundamental and Third Harmonic FEL at LEBRA. Jpn. J. Appl. Phys. 41 Suppl. 41-1 (2002) 54-57.
- (9) 橋本英子、早川恭史、佐藤勇、早川建、田中俊成、横山和枝、菅野浩一、境武志、石渡謙一郎、 中尾圭佐、藤岡一雅、村上琢哉、長谷川崇、宮崎慎也: FEL 発振によって強調された3次高調 波の測定. Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan (2002.8)267-269.

- (10) 早川恭史、佐藤勇、早川建、田中俊成、横山和枝、境武志、菅野浩一、石渡謙一郎、橋本英子、 中尾圭佐、藤岡一雅、村上琢哉、長谷川崇、宮崎慎也:日大 FEL の現状と光源実用化に向けた 改良. Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan (2002.8)272-274.
- (11) 長谷川崇、宮崎慎也、境武志、中尾圭佐、菅野浩一、石渡謙一郎、村上琢哉、橋本英子、藤岡一雅、佐藤勇、早川建、田中俊成、早川恭史、横山和枝: FEL 共振器ミラーの反射率の測定.
   Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan (2002.8)281-283.
- (12) Y.Hayakawa, I.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, K.Yokoyama, T.Sakai, K.Kanno, K.Ishiwata, E.Hashimoto: Characteristics of the Fundamental and 3rd Harmonic FEL at LEBRA. Nucl. Instr. and Meth. A507 (2003) 404-408, Free Electron Lasers 2002, Proceedings of the 24th International Free Electron Laser Conference and 9th FEL Users Workshop (Argonne, Illinois, U.S.A., 2002.9)
- (13) K.Yokoyama, I.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, K.Kanno, T.Sakai, K.Ishiwata, E.Hashimoto: Stability of the LEBRA Infrared FEL. Nucl. Instr. and Meth. A507 (2003) 357-361, Free Electron Lasers 2002, Proceedings of the 24th International Free Electron Laser Conference and 9th FEL Users Workshop (Argonne, Illinois, U.S.A., 2002.9)
- (14)中尾圭佐、佐藤 勇、早川 建、田中俊成、早川恭史、横山和枝、境 武志、菅野浩一、石渡謙一郎、長谷川 崇、宮崎慎也:日本大学電子線利用研究施設における FEL 共振器長の微小変化の 測定. Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan (Jul. 30-Aug.1,2003,Tokai) 396-398.
- (15) T.Tanaka, K.Hayakawa, I.Sato, Y.Hayakawa and K.Yokoyama: Observation of SASE in LEBRA FEL System. Nucl. Instr. and Meth. A 528 (2004) 486-490, Proceedings of the 25th International Free Electron Laser Conference and 10th FEL Users Workshop (Tsukuba, Ibaraki, Japan, Sep.8-12, 2003).
- (16) A.Mori, K.Hayakawa, I.Sato, T.Tanaka, Y.Hayakawa, K.Yokoyama, K.Nogami, T.Sakai, K.Kanno, K.Ishiwata, K.Nakao, A.Kidokoro, M.Inagaki, H.Takasaki: Measurement of FEL Output Fluctuation at LEBRA. Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan (August 4-6, 2004, Funabashi Japan) 561-563.
- (17) K.Hayakawa, K.Yokoyama, K.Nakao, I.Sato, T.Tanaka, Y.Hayakawa: Measurements of the Pulse Length of the FEL Nonlinear Harmonics Radiation. Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan (August 4-6, 2004, Funabashi Japan) 649-651.
- (18) Y.Hayakawa, I.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, K.Yokoyama, T.Kuwada, A.Mori, K.Nogami, T.Sakai, K.Kanno, K.Ishiwata, K.Nakao: Analysis of the Gain Saturation in LEBRA FEL Using GENESIS. Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan (August 4-6, 2004, Funabashi Japan) 652-654.
- (19) T.Tanaka, K.Hayakawa, Y.Hayakawa, I.Sato: Guiding Optics System for LEBRA FEL User Facility. Proceedings of the 26th International Free Electron Laser Conference and 11th FEL Users Workshop (August 29 - September 3, Trieste, Italy) 427-430.
- (20) T.Tanaka, K.Hayakawa, Y.Hayakawa, A.Mori, K.Nogami, I.Sato, K.Yokoyama, K.Ishiwata, K.Kanno, K.Nakao, T.Sakai: Tunability and Power Characteristics of the LEBRA Infrared FEL. Proceedings of the 26th International Free Electron Laser Conference and 11th FEL Users Workshop (August 29 September 3, Trieste, Italy) 247-250.

・学位の取得状況

- (1) 橋本 英子:修士(理学),計算機シミュレーションによる自由電子レーザーの特性の研究,2003 年3月,日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻
- (2) 中尾 圭佐:修士(工学),自由電子レーザー共振器長の微小変化に関する研究,2003年3月,日 本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻
- (3) 村上 琢哉:修士(理学),自由電子レーザー用平行ビーム導光システムについて,2003年3月, 日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻

# PROCEEDINGS OF THE 25TH LINEAR ACCELERATOR MEETING IN JAPAN

July 12 - 14, 2000 Himeji, Japan

Japan Synchrotron Radiation Research Institute

[12D-04]

## **CONSTRUCTION OF THE INFRARED UNDULATOR AT LEBRA**

K.Hayakawa<sup>\*)</sup>, T.Tanaka, Y.Hayakawa, Y.matsubara, K.Sato, I.Sato H.Nakazawa<sup>A)</sup>, K.Yokoyama<sup>A)</sup>, T.Sakai<sup>A)</sup>, K.Kanno<sup>A)</sup>, K.Ishiwata<sup>A)</sup>, H.Inokawa<sup>A)</sup>, Y.Nakamura<sup>A)</sup>

> Atomic Energy Research Institute of Nihon University 7-24-1 Funabashi Narashinodai 274-8501 Japan

<sup>A)</sup>Graduate School of Science and Technology, Nihon University 7-24-1 Funabashi Narashinodai 274-8501 Japan

## Abstract

The new undulator has been constructed for infrared FEL at LEBRA. Pieces of permanent magnet are set on the same mount as the visible-ultraviolet undulator which magnets are damaged by radiation and removed. The period of 48mm is decided to cover the FEL wavelength range from 1 to 5  $\mu$ m correspondence to the electron energy of 50 to 100MeV. To maximize small signal gain, minimum gap width is selected 29mm for obtaining the *K* of unity at which small signal gain is peaked. Two types of mirrors are prepared, Au courted one and dielectric multi-courted one. The Au courted mirrors are for using wide range of wavelength. The multi-courted mirrors are for wavelength of 1.5 $\mu$ m. First light was observed at May in this year.

## 1. はじめに

昨年度、永久磁石の放射線劣化によって、可視・紫 外用のアンジュレーターが使用不可能になった[1,2]。 この永久磁石は放射化物となり、メーカーでは作業で きないため、着磁装置から製作しなければならず、再 着磁には相当の時間がかかることが予想された。新た に製作することについてはこの問題はないので、待ち 時間を利用して赤外領域のアンジュレーターを新たに 製作し、実験を行うことにした。ここでは永久磁石の 形状及び光キャビティーのパラメーターの決定過程等 について報告する。

#### 2. 小信号利得とK值

自由電子レーザーはもともと利得が小さいので、少しでもこれを大きくする条件を作らなければならない。 アンジュレーター中の光ビームの太さは、電子ビーム と重なり合っている限り、小さければ小さいほど電場 が強くなり、利得も人きくなる。光キャビティーの中 で、アンジュレーターの長さにわたって光が最も平行 ビームに近く、細くなる条件は、レーリー長をアンジ ュレーター長の半分の長さにすることで実現する。こ の条件の下で、自由電子レーザーの小信号利得*GをK* 及び*I*,*N*の関数として求めると、次のようになる。

$$G = 0.54\pi^{2} \left(\frac{I}{I_{a}}\right) \frac{8K^{2}N^{2}}{\gamma(1+K^{2})} \{J_{0}(\xi) - J_{1}(\xi)\}^{2}$$
  
ここで \xi =  $\frac{K^{2}}{2(1+K^{2})}$ 、これは、他の条件が同じなら

ば、利得は電子エネルギーに反比例して大きくなるこ とを意味している。言い換えれば、共振波長の平方根 に比例して利得が大きくなる。また、周期数の二乗に 比例する。図1は、周期数50の場合に波長をパラメー





<sup>&</sup>lt;sup>\*)</sup>K.Hayakawa, 047-469-5489, hayakawa@acc.phys.cst.nihon-u.ac.jp

ターとして、K 値(ms)と 1A あたりのゲインをプロットしたものである。この図から分かるように、利得は K=1.1のあたりにピークを持つ。また、アンジュレーター放射光の基本波の強度は $K=0.7\sim0.8$ あたりで 最大になることを合わせて考えると、Kは1程度の値 を持つことが有利である。但し、この利得は電子ビームが理想的な性質(エミッタンス、エネルギー幅共に ゼロ)を持つ場合の計算であるから、実際にはこの半 分程度の利得だと思わなければならない。

#### 3. 各種パラメーター

小信号利得に関する以上の考察をふまえ、次のこと 考慮してアンジュレーターのパラメーターを決定した。

- ギャップ調整装置は可視・紫外用(2400mm)と共 用する。
- 目標波長1μm ~5μm。
- 3) ギャップをできるだけ大きくする。
- 4) K = 1 前後で使用できるようにする。

現在製作可能な永久磁石の残留磁束密度は1.28T 程 度でなので、この値を基にギャップ間隔とK値との関



図 2. 各周期長に対するギャップとK 値の関係。



図 3. 共振波長と K 値の関係、パラメーターは電 子エネルギー。

係を計算した。周期長 36 mm と 48 mm の場合につ いて図 2 に示す。K = 1 となるギャップの大きさは、 周期長 36mm 及び 48mm の場合、それぞれ 20mm 及び 31mm となる。この計算では、磁石片の高さ,すなわ ちギャップ方向の長さが 35mm の場合の計算であるが, この寸法はこれ以上大きくしてもほとんど結果に影響 しない。アンジュレーター長を一定とした場合,当然 周期長が短いほど周期数が多くなる。先に示したよう に自由電子レーザーの利得は、周期数の二乗に比例し、 また,同じ波長の光を得るのにも低い電子エネルギー でよく、これも利得を大きくする。この点からは周期

表1 赤外用アンジュレーターのパラメーター

周期長	48	mm	
周期数	50		
ギャップ	>29	mm	
K	<11		



図4. 中心軌道からのずれに対する磁場の変化。パ ラメーターは磁石片の幅。

長 36mm としたほうが良い。しかし、より長波長まで 使えるように、また可視・紫外用アンジュレーター永 久磁石の放射線劣化の経験を踏まえて、ギャップ間隔 を大きくできるように、周期長 48mm を採用すること にした。従って周期数は 50 となる。表1に決定したパ ラメーターを示す。また、電子ビームエネルギーをパ ラメーターとした K 値と基本波の共振波長の関係を図 3 に示す。この図から分かるように、エネルギーを 50MeV まで下げることができれば、5μm までの実験 が可能になる。

次に、永久磁石片の寸法を決めなければならない。 ハルバッハ型の構成にすると軸方向の寸法は12mmに 決まってしまう。高さは先に述べたようにあまり磁場 分布に影響しないので,紫外・可視用の場合と同じ 35mm とした。幅すなわち軸に垂直方向の寸法は中心 面上で、軸に垂直方向の磁場分布に影響する。この関 係を図4に示す。この寸法が小さいと、中心軸から外 れた場所に於ける磁場の変化が大きく,実効的にKの 値が変化し,スペクトルを悪化させると考えられる。 ギャップ調整装置に取り付けられる限界のサイズ 80mmを採用した。この場合中心から5mm ずれた位置 で約0.1%の変化である。

#### 4. 光共振器

光共振器のミラーホルダーは紫外・可視用アンジュ レーターを共用するものとすると、ミラー間隔は 6.178mである。アンジュレーターの中心は光共振器の 中心から 0.11m ほど上流側にずれているが、前後の鏡 は同じ曲率半径にして、光ビームのウエストは光共振 器の中央にできるようにした。鏡は広帯域で使える Au コートミラーと 1.5 $\mu$ m 専用の誘電体多層膜ミラーを製 作した。前述したように、アンジュレーター中で、光 ビームが平行ビームに近く、最も細くなる条件はレー リー長  $Z_R$  をアンジュレーター長の半分の長さにする ことである。すなわち、 $Z_R$ =1.2mである。これに対応 する鏡の曲率半径は 3.788m となる。一方、光が安定 に鏡の間を往復する条件の曲率半径の限界が空洞長の 半分すなわち、3.359m なので、 $Z_R$ =1.2m とする鏡に曲 率半径はこれより大きく、安定条件を満足している。

## 4.1 金コートミラー

自由電子レーザーを波長可変にして使うには、広い 帯域にわたって高い反射率を持つ鏡が必要である。Au コートは赤外領域の広い帯域に対して高い反射率を持 っているので (1µm で 98%、>1.5µm では 99%以上), この用途に適している。光の取り出しは一方の鏡の中 心に穴を穿つ方法を採用した。取り出された光は光共 振器にとってはロスとなるので、あまり大きくするこ とはできない。鏡メーカーで標準品として持っている 最小穴径が 0.5mm であったので、この値を採用するこ とにした。取り出される光の量は穴の大きさを決めれ ば、鏡の場所に於けるスポットサイズで決まる。鏡の 曲率半径を上記の最適条件に近い 3.7m としたとき, レーリー長は1.37mとなる。ガウシャンビームを仮定 すると、1µmの光では取り出される割合は3.3%となる。 またキャビティー中心に於けるスポットサイズは 1.3mm である。この波長に対しては穴の大きさがやや 大きすぎたと思われる。

#### 4.2 誘電体多層膜ミラー

このアンジュレーターによる最初の発振実験は、既 存のモノクロメーター及びディテクターを使うことを 前提に考えて、1.5µm で行う。金属コートミラーのよ うに,鏡に穴をあけて光を取り出す方式は、波長が短 い場合には制約が多いので、この波長専用の誘電体多 層膜ミラーを製作することにした。誘電体多層膜ミラ ーは狭い帯域に対しては反射率を自由にコントロール できるので、最適な条件を作り出すことができる。曲 率半径 4m、反射率 99.25%のものを 2 枚製作して使用 することにした。

#### 5. アンジュレーター放射光

今回製作した赤外アンジュレーレーターの放射光の スペクトルを評価した。Kパラメーターの値は1.1、電 子ビームの条件は、エネルギー100MeV、エネルギー 幅±0.5%、エミッタンス0.15mm.mrad、最小ビーム半 径0.5mm、電流200mAである。電子ビームのアンジ ュレーター内でベータートロン振動は考慮していない。 電子ビームの進行方向真正面から見た時に得られるス ペクトル例を図5に示す。



図 5. 100MeV の電子ビームによる赤外用アンジュ レーターからの放射光のスペクトル。

## 6.まとめ

今回製作した赤外アンジュレーターを使った実験は 5月から開始され、アンジュレーター放射光を観測し た[3]。発振波長を1~5µmと設定したが、短波長側は 鏡の取り出し穴の関係で、共振器のロスが大きく発振 は難しそうである。これは本質的な困難ではないが、 当面1.5µm以上の波長での運用になりそうである。長 波長側は、電子エネルギーをビームの性質を悪化させ ずにどこまで下げられるかによる。これはまだ試みて いないので、今後の課題である。

#### 参考文献

 I.Sato, et al. Proc. of the 12th Symposium on Accelerator Science and Technology, Wako (1999) 37

- [2] I.Sato, et al. Proceedings of this meeting.
- [3] Y.Hayakawa, et al. Proceedings of this meeting

[13P-27]

## **OBSERVATION OF IR SPONTANEOUS RADIATION AT LEBRA**

Y. Hayakawa, I. Sato, K. Sato, K. Hayakawa, T. Tanaka, Y. Matsubara,

H. Nakazawa<sup>A)</sup>, K. Yokoyama<sup>A)</sup>, K. Kanno<sup>A)</sup>, T. Sakai<sup>A)</sup>, K. Ishiwata<sup>A)</sup>, H. Inokawa<sup>A)</sup>, Y. Nakamura<sup>A)</sup>

Atomic Energy Research Institute, Nihon University 7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501 Japan

<sup>A)</sup>College of Science and Technology, Nihon University 7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501 Japan

#### Abstract

The FEL system of the Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) of Nihon University was reconstructed for the infrared region (IR) from 0.8  $\mu$ m to 5  $\mu$ m. In order to check the performance, the spontaneous radiations generated by the new undulator were observed using a CCD video camera. It was demonstrated that the wavelength of the visible spontaneous radiations, which correspond to the higher harmonics, can be controlled by adjustment of the undulator gap width.

The time structure of the radiation measured by a photo detector indicates that the yield of the radiation has the linearity to the electron beam current and the undulator generates enough IR radiation. The spectra of the 2nd and 3rd harmonic radiation with much narrow widths were also obtained. These results mean that the new undulator works as an IR photon generator.

## 日大FEL赤外放射光の観測

## 1. はじめに

日大原子力研究所電子線利用研究施設 (LEBRA) で は 1998 年に 125 MeV 電子線形加速器による電子ビー ムの加速に成功し、可視光用アンジュレータによる自 発放射光の発生を確認した [1, 2]。その後、より詳しく アンジュレータ自発放射光の測定を行なったところ、 アンジュレータ磁場の不整を示唆するようなスペクト ルが得られた [3]。実際、アンジュレータ磁石列の磁 場測定によって永久磁石の磁束密度の減少と磁場分布 の不整が確認された。不整になった磁場分布と磁石列 の放射化の程度に相関が見られることから、この現象 は放射線によるダメージであると思われる [4]。永久 磁石の材質に採用している Nd-Fe-B には熱に弱いと いう特性があり、40°C以上で保磁力が減少すること から、アンジュレータ通過中にロスした電子ビームの 照射によって局所的な温度上昇が発生したことが減磁 の主な原因の1つとして考えられる。

今回、アンジュレータを修理するにあたって、その まま可視光用アンジュレータとして復元するのではな く近赤外 FEL 用アンジュレータとして改造すること にした [5]。そのために周期長を従来の 2 倍の 48 mm にした磁石列を新たに製作し、既存の磁石列との交換 を行なった。新しい赤外用アンジュレータ磁石列は波 長 800 nm から 5 μm までの領域をカバーできるよう Table I: 電子線形加速器と赤外 FEL 発生装置の仕様

最大電子ビームエネルギー	$125 { m MeV}$
ビーム電流	200  mA
マクロパルス幅	$20 \ \mu s$
繰り返し	$12.5~\mathrm{Hz}$
アンジュレータ磁気回路	ハルバック方式
周期長	48  mm
周期数	50
磁石材質	Nd-Fe-B
最大磁束密度	$1.28 { m T}$
ギャップ間隔	$29{\sim}40 \text{ mm}$
実効 K 値	$0.57 {\sim} 1.2$
放射光の基本波長	$0.8{\sim}5~\mu{ m m}$
光空洞の長さ	$6718 \mathrm{~mm}$
光共振器ミラー	誘電体多層膜
FEL 平均出力	$1{\sim}6$ W

に設計されている [6]。現在は波長 1.5 μm での赤外 FEL の発振を目指しており、この波長に合わせた多層 膜ミラーを光共振器の反射境として使用している。電 子線形加速器と赤外 FEL 用アンジュレータの仕様を Table I に、アンジュレータギャップ間隔と発生する自 発放射光の波長との関係を Fig. 1 にそれぞれ示す。

<sup>\*</sup>e-mail: yahayak@acc.phys.cst.nihon-u.ac.jp



Figure 1: アンジュレータギャップ間隔と発生する自 発放射光の中心波長の関係。



Figure 2: CCD ビデオカメラで観測した自発放射光 の 2 次及び 3 次高調波。電子ビームのエネルギーは 98 MeV、アンジュレータギャップ間隔はそれぞれ左 上 31 mm、右上 32 mm、左下 33 mm、右下 34 mm。

## 2. 自発放射光の観測

赤外用に改造されたアンジュレータによって実際に 放射光が発生するかどうかを確認するために、CCD ビデオカメラを用いた観測を行なった。電子ビームの エネルギーが 98 MeV の時、アンジュレータのギャッ プ間隔が 29 mm から 40 mm までの範囲 (実効 K 値 1.18~0.57)で可視光の自発放射光を観測することがで きた。この条件で理論的に見積もられる基本波は近赤 外領域の光となるため、観測されたのは 2 次及び 3 次 高調波であると考えられる。Fig. 2 は金属ミラーを使っ て輸送された放射光を望遠鏡で集光し、それを CCD ビデオカメラで撮影して得られた画像の一部である。 ギャップ間隔の調整によって光の色が変化していくこ とも確認でき、この新しい赤外用アンジュレータが放 射光発生装置として機能していることが分かった。

#### 3. フォトダイオードによる放射光パルスの測定

CCD ビデオカメラによる観測と同様に、放射光パ ルスの時間的な構造を調べるために望遠鏡で集光し た自発放射光を Si フォトダイオード検出器で測定し た。オシロスコープを使って取得した光検出器の出 力を Fig. 3 に示す。この検出器の感度は長波長側で 1 µm 程度までしかない。従って自発放射光基本波の 中心波長がおよそ 1 µm となる電子ビームエネルギー 96 MeV、アンジュレータギャップ間隔 36.5 mm とい う条件で測定した。Fig. 3 の上図は放射光による信号 とアンジュレータの直前に設置されたコアモニターで 測定したビーム電流とを比較したものである。両者の 時間構造が非常に良く一致していることから、測定さ れた光は電子ビームで生成された自発放射光であり、 その光量がアンジュレータを通過する電荷量に対して 良い線形性を持っていることが分かる。

下図では赤外透過フィルター(透過率: 50 %@1 μm, 10 %@770 nm)を通して放射光を測定した場合と直



Figure 3: 赤外用アンジュレータで発生した自発放射 光パルスの時間構造。上:ビーム電流の信号との比較。 下:赤外透過フィルターを使用の有無による違い。こ の時の電子ビームのエネルギーは 96 MeV、アンジュ レータギャップ間隔は 36.5 mm。

接測定した場合を比較している。図にあるようにビー ム電流はほぼ同じであるが、光検出器の出力はフィル ターを通して測定した方がおよそ1/3となった。この 測定では望遠鏡による集光を行なっているため、検出 器に入射する放射光には基本波と3次高調波だけでは なく、見込み角のついた2次高調波が含まれている。 可視光の主成分は2次高調波であると思われる。今回 使用したフィルターの透過率をから、検出器のレスポ ンスの約半分は近赤外領域の光によるものと見積もる ことができる。さらに波長1 µm の光に対する Si フォ トダイオードの量子効率が可視領域の光に比べて約 20%である点を考慮すると、検出器に到達した赤外 領域の基本波の強度は可視光である 2 次、3 次高調波 の 4~5 倍程度と評価できる。この光検出器のレスポ ンスが波長 633 nm の光に対して 2 V/1 mW である ことから、少なくとも 2 mW 程度の赤外自発放射光 が発生していることになる。

## 4. 自発放射光のスペクトル

赤外自発放射光の発生が確認できたため、次に放射 光のスペクトルを測定することを試みた。Fig. 4 は電 子ビームエネルギー 96 MeV、アンジュレータギャップ



Figure 4: 分光器で測定した自発放射光のスペクトル。 a)2 次高調波、b)3 次高調波と考えられる。測定時の電 子ビームエネルギーは 96 MeV、アンジュレータギャッ プ間隔は 37 mm である。

間隔 37 mm という条件で、グレーティング方式の分 光器を用いて測定された結果である。分光器のイメー ジング装置として CCD カメラを使用しており、その シャッターをリニアックのマクロパルスと同期させる ことが可能である [7]。今回は露光時間は 30 ms で測 定した。この測定で得られたスペクトルは近赤外、可 視共にアンジュレータの周期数で決まる基本波の半幅 2%より狭い幅をもっている。この原因として、見込 み角がついた放射光のスペクトルを測定してしまった ことが考えられる。自発放射光はアライメント用レー ザと異なり望遠鏡で集光後再び発散してから分光器に 入射するため、アライメントが不十分であった可能性 がある。Fig. 4 の a)、b) はそれぞれ見込み角がつい たためにピーク波長が長波長側にシフトした 2 次、3 次高調波であると思われる。

## 5. まとめと今後の課題

近赤外 FEL 用に改造されたアンジュレータによる放 射光の発生を試みた。その結果、可視領域の自発放射 光をビデオカメラで観測することに成功し、アンジュ レータギャップ間隔の調整による波長の変化も確認す ることができた。フォトダイオードを用いた測定では 自発放射としては十分な強度の赤外放射光が発生して いることがわかった。また分光器を使って高調波と思 われる非常に狭い幅をもったスペクトルも得られた。 以上の実験結果から、改造後のアンジュレータは近赤 外放射光発生装置として概ね正常に機能しているもの と考えられる。

今回、アンジュレータ自発放射光に対して行なわれ たスペクトル測定はまだ予備的なものであり、分析も 不十分である。今後より精密な測定をしていく必要が ある。また、現在の FEL 発生装置の発振波長に設定 している 1.5 µm での測定を予定している。特に高速 な赤外線検出器 (Hg-Cd-Zn-Te) を用い、赤外放射光 のビルドアップを観測することが重要な課題として挙 げられる。

#### References

- I. Sato et al., Proc. of 23rd Linear Accelerator Meeting in Japan, p. 22 (1998)
- [2] Y. Hayakawa et al., Proc. of 23rd Linear Accelerator Meeting in Japan, p. 334 (1998)
- [3] H. Nakazawa et al., Proc. of the 12th Symposium on Accelerator Science and Technology, p. 394 (1999)
- [4] I. Sata et al., Proc. of the 12th Symposium on Accelerator Science and Technology, p. 37 (1999)
- [5] I. Sato et al., Proc. of this Meeting.
- [6] K. Hayakawa et al., Proc. of this Meeting.
- [7] Y. Hayakawa et al., Proc. of 24th Linear Accelerator Meeting in Japan, p. 368 (1999)

# PROCEEDINGS OF THE 26<sup>th</sup> LINEAR ACCELERATOR MEETING IN JAPAN

August 1-3, 2001

Tsukuba, Japan

URL http://conference.kek.jp/LAM26/

High Energy Accelerator Research Organization

## FEL ビームのための補償光学システム

橋本英子<sup>1, A)</sup>、藤岡 一雅<sup>A)</sup>、村上 琢哉<sup>A)</sup>、中尾 圭佐<sup>A)</sup>、

佐藤 勇<sup>B)</sup>、早川 建<sup>B)</sup>、田中 俊成<sup>B)</sup>、早川 恭史<sup>B)</sup>、佐藤 和男<sup>B)</sup>、

中澤 裕之<sup>A)</sup>、横山 和枝<sup>A)</sup>、菅野 浩一<sup>A)</sup>、境 武志<sup>A)</sup>、石渡 謙一郎<sup>A)</sup>、猪川 弘康<sup>A)</sup>、中村 吉宏<sup>A)</sup> <sup>A)</sup>日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎

<sup>B)</sup> 日本大学原子力研究所

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎

## 概要

FEL を平行ビームとして装置室より各実験室まで 光の偏光性や干渉性をたもったまま導光するため、 FEL のビーム径を一定にする光学系を設計した。光 学的収差を考慮し、軸対称非球面を用いて、ミラー の条件などを考慮し、出力光の品質維持と、光の減 裏を防ぐビーム輸送システムになっている。また、 計算機から理論値を求めシミュレーションした。

## 1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設では、2001年5月に 自由電子レーザー(FEL)発振に成功した。当施設 では光利用実験に使えるよう安定レーザーの開発に 取り組んでいる。また、この光源を使って、理学、 工学、医学の学術分野を包含する多彩な利用研究の 成果が期待されている。出力光の品質を維持し、光 の減裏を少なくして、収差による像の歪み、ぼけを 小さくする方法について考察する。そこで、高分解 結像に適した非球面レンズについて述べる。光学系 で用いられる非球面は特殊な例を除き、軸対称回転 非球面である。軸対称非球面の場合、面頂(光軸と の交点)の近傍では球面とみなされ、近軸領域での 光線の屈折、反射は、球面の場合と変わりない。球 面との差異が生ずるのは、近軸領域外であり、こ - D 差異を利用して収差補正を行うのが非球面の目的で ある。

## 2. 原理

#### 2.1 軸対称非球面

軸対称な非球面の表示は、対称軸を光軸とし、光 軸を含む面の切口の曲線(子午面内の曲線)を用い ればよい。一般的な表示としては、2次曲線をベー スにこれに非球面を付加した式がある。

## 2.2 一般的な表示

軸対称回転非球面は、*z*面から曲面上の点 A までの距離をρとして次式に示される。

$$z = a_1 \rho^2 + a_2 \rho^4 + \dots + a_m \rho^{2m} \quad (1)$$
  
$$\rho^2 = x^2 + y^2 \quad (2)$$

2.3 回転2次曲面

回転2次曲面は、次の式で表される。

$$z = c \frac{\rho^2}{1 + \sqrt{1 - Kc\rho^2}} \tag{3}$$

cは曲率、Kは $K = \frac{b^2}{a^2}$ 主軸が(2a,2b) 中心が(a,0)

Kは回転楕円面の時K > 0、回転放物面の時K = 0となる。

### 2.4 2次曲面を基本にした非球面

回転二次曲面をベースにし、高次の非球面量を付 加すると

$$z = c \frac{\rho^2}{1 + \sqrt{1 - Kc^2 \rho^2}} + a^2 \rho^4 + \dots + a_m \rho^{2m} (4)$$

これは、回転非球面を表している。上式の第1項は 回転2次曲面(楕円面、放物面)を表し、第2項以 下は高次非球面を表す。これらの2曲面を用いた反 射鏡は、球面レンズとは異なり、共役点では近軸光 線以外でも無収差となっているのが特徴である。

## 2.5 ミラー設計条件

良質な集光に必要な条件は、物点から像点までの 光路差の絶対値が、波長の1/4以下であること、つ まり、アッベの正弦条件を満足することである。こ れは、1点から出た光が、異なる光路を経た後、像 面で光の位相が互いに強めあう条件としている。光 軸に垂直な物体面上の物点の結像が光路によって変 わらないことが条件で、物点から光学系を見込む角 を(、像点から光学系を見込む角をα'としたとき

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> E-mail: 82wani82@acc.phys.cst.nihon-u.ac.jp

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha'} = const \tag{5}$$

を満足することがもう1つの条件である[1]。

## 2.6 反射光学系

反射光学系では、タイプの異なるレンズを組み合わせて,個々の収差を相殺する工夫がなされている。 我々は、一つの焦点を共有する回転放物面と回転楕円面を組み合わせた。これらのミラーは、2方向同時に集光する場合に用いる。楕円面の一方の焦点を物点として出たビームは、最初に楕円面で反射し、 共有焦点を実物点として放物面に入射し、他の焦点で、ビームを集光する。この経路は、反射面のどこに入射しても一定の距離になる。このミラーの組み合わせだと収差がきわめて少なく、理論的には数 nm の分解能が期待できる<sup>[2]</sup>。

## 3. ビーム輸送

図1にレーザー発生装置の配置図、図2にレーザ ービームラインとレーザー発生装置から実験室まで のレーザー照射実験室の照射装置を示す。アンジュ レーター(U)から出力されたFELは、平面ミラーで、 反射させ、図3に示すような平行化装置(BE)内の回 転楕円ミラー、回転放物ミラーによって平行ビーム に整形された後,輸送部、光配装置を通って増築棟 の各実験室に導光される。ただし、ACC は加速器、 BD はビームダンプを表す。





図2-1:レーザービームラインの分岐点



図2-2:医用レーザー照射装置

## 4. 平行化装置

FELの光共振器(反射鏡 M0)に 0.5mm $\Phi$ の穴を 開けて、これを光源とし、21cm 離れたところに平面 鏡 M1を置き、光源を楕円反射鏡 M2の焦点からの 光路に仮想的に一致させ、M2の他の焦点にフォー カスさせる。M2の焦点を放物面鏡 M3の焦点と一致 させ、焦点を通った光は M3の面で平行光線になり、 平面鏡 M4 で、光共振器の光軸と平行になるように 偏向される。この平行光軸と光共振器の光軸とは建 物の制約から 155.0cm 離れていなければならない。 M2、M3 は半固定で、光軸合わせは主に M1 と M4 とで行う。したがって、M2 と M4の光軸は遠隔操作 にする。特に M1 と M4 は移動軸と $\theta$ 、 $\Phi$ の 3 軸が 最低必要となる。M2 の調整は非常に微妙で一度固 定したら動かさない。M2 と M3の距離を少し変える ことで M3 からの像の大きさが変わる。

## 5. シミュレーション

計算機で数値計算を使ってこれらの条件を満たす 数値を求めた。最終ビームの直径は3.0cm ゆに設定さ れていることと、コンパクトな装置が要求されてい る観点から表1の data1 が、最適値となる。図4に この data1 のシミュレーションの結果を示す。data2 と data3 は、最終ビームの直径が3.0cm ゆ以上になっ てしまった。

	data1	data2	data3
楕円の長軸(cm)	125	150	80
楕円の短軸(cm)	85	100	55
放物線の定数	0.0056	0.0056	0.0067
M1の傾き(rad)	2.18	1.88	2.18
M4 の傾き(rad)	0.52	0.19	0.52
ホールの直径(mm)	0.5	0.5	0.3
波長(mm)	0.005	0.003	0.005
最終ビームの直径(cm)	2.94	3.14	3.97
発散角(rad)	0.005	0.005	0.0083

## 表1:数値計算の結果

## 6. 今後の課題

装置を設置する、シミュレーションの結果を考慮 して平行化、レーザー照射共同実験室でビーム取出

し口でのビーム径の測定を行う。FELの出口にお けるビーム径と平行化装置を通った後のビーム径な どを測り、平行化されたビームがシミュレーション 通りの径変化をしているかどうか測定し、中距離輸 送後にその径を維持できているか、また、その間の 変化について検証する。次に、ビーム出力の測定な どが挙げられる。ビームの性能、中距離輸送による ビームの質の変形があるかどうか考察する。そして、 これらの実験を通して、FEL平行化装置と、ビー ム輸送に関する総合的な評価をおこなう。

## 参考文献

[1] 大柳宏之"シンクロトロン放射光の基礎"[2] 波岡武、山下広順共編"X線結像光学"



図3: data1のシミュレーションの結果

## アンジュレーター光による FEL ビームラインのビーム診断

田中俊成<sup>1,A)</sup>、早川 建<sup>A)</sup>、早川恭史<sup>A)</sup>、佐藤 勇<sup>A)</sup>、横山和枝<sup>B)</sup>、菅野浩一<sup>B)</sup>、境 武志<sup>B)</sup>、石渡謙一郎<sup>B)</sup>、 猪川弘康<sup>B)</sup>、中村吉宏<sup>B)</sup>

A) 日本大学原子力研究所 電子線利用研究施設

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎

<sup>B)</sup> 日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻

〒274-8501千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎

## 概要

FEL 用電子ビームラインを、実験中に常時モニタ ーする方法の一つとして、アンジュレーター中で発 生する自発放射光を利用する方法を検討し、小型で 安価な望遠鏡によるビームモニターシステムを製作 した。FEL 共振器に誘電体多層膜ミラーを用いてい るので、ここでは発振に使われずミラーを素通りし た高調波の光を利用する。FEL 発振への影響が全く なく、発振時の強い光による損傷の心配も少ないと いう利点がある。原理は簡単で、望遠鏡にアンジュ レーターからの光を導入し、その光を CCD ビデオカ メラに結像させることでアンジュレーター内での電 子ビームの位置とビーム形状を知ることができる。 望遠鏡は3台用い、それぞれアンジュレーターの上 流、中央、下流に対応する位置に焦点を合わせ、モ ニターTV で見ながらビーム調整を行えるようにし た。

## 1. はじめに

1999年、日本大学電子線利用研究施設(LEBRA) において可視〜紫外領域でのFEL発振実験を行って いる間に、アンジュレーターが強い放射線に曝され 永久磁石の磁化が低下して使えなくなる、という問 題が生じた<sup>(1)</sup>。アンジュレーター磁石各部について測 定した残留放射能と磁場低下との相関から、アンジ ュレーターの前後と中央に置かれた蛍光板ビームプ ロフィールモニターで発生する放射線が主要な原因 と推定された。

これを機会にアンジュレーター磁石列を変更し、 電子ビーム透過が容易なビームダクト径を考慮し、 磁極間隙が広く周期長が2倍の赤外用アンジュレー ターを製作した<sup>[2],[3]</sup>。しかし、いずれにしても放射線 による磁石の劣化を避けるために蛍光板によるビー ムモニターは使わず、それに代わる非破壊型のビー ムモニターを検討する必要があった。

その一つとして、ストリップライン方式のビーム 位置検出器<sup>(4)</sup>をアンジュレーターの前後のビームラ イン上に設置するために製作し、ビーム誘起マイク ロ波による位置検出特性の測定・試験を行っている<sup>[5]</sup>。

## 2. 高調波光の利用

アンジュレーター中のビームライン上任意の点で 放射される自発放射光の横方向分布は、基本波か高 調波かによらずその放射源である電子ビームの横方 向分布を直接反映する。従って、アンジュレーター 中の任意の点に合焦させた光学系で結像される像は、 その点での自発放射光の分布を示すとともに電子ビ ーム形状も表す。この像を得るために利用する光と しては、光学系の組み立てと画像化の容易さから可 視光が最も適している。

LEBRA 赤外用アンジュレーターで目標としてい る FEL 発振波長範囲は 1~5μm である。当面 1.5μm で の発振実験のために共振器には中心反射率 99.5%の 誘電体多層膜ミラーを使っている。

誘電体多層膜ミラーを使うと大出力 FEL による破 損の心配があるが、FEL 発振に影響を与えることな く常時高調波をモニターすることができる。特に奇 数次の高調波はビームラインの軸上に強く放射され るので、アンジュレーターから離れた点で観測する のに都合が良い。

現在使用している 1.5µm 用のミラーは高反射率の 波長範囲が 200nm 程度と狭く、可視以上の短波長光 は共振器内に蓄積されずほとんどミラーを素通りす る。従って可視光である波長 500nm の第3高調波が ミラーの裏側から容易に観測できる。

このことからアンジュレーターからの第3次高調 波光を利用し、小型の望遠鏡を使って結像するシス テムを検討した。

## 3. 予備実験

実際にシステムを構築する前に予備的な自発放射 光観測実験を行い、第3次高調波の自発放射光分布

一方、S.Benson<sup>[6]</sup>によれば、アンジュレーターの自 発放射光をビーム軸上から望遠鏡で直接観測するこ とによってアンジュレーター中でのビームの振舞が 詳細に観測できる。そこでアンジュレーターのビー ムラインの光学的延長上に望遠鏡を設置してビーム 位置および形状をモニターするシステムを検討し、 製作した。以下においてこのシステムについて詳細 に述べる。

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> E-mail: tanaka@lebra.nihon-u.ac.jp



図1:自発放射光観測光学系の配置。アンジュレーターからの自発放射光のうち第3次高調波光を観測 することにより、電子ビームの位置・形状をモニターする。望遠鏡は3台設置し、それぞれアンジュレ ーターの上流、中央、下流の各部で生じた自発放射光を観測する。

を示すスポット像を CCD ビデオカメラで観測した。 磁石部分の全長 2.4mのアンジュレーター中心から軸 上で約 10m 離れた点に焦点距離 500mm、口径 76mm の屈折望遠鏡を置き、アンジュレーターからの光を 集光して焦点距離 20mm の接眼レンズで像を拡大投 影して CCD カメラに結像させた。

この結果、望遠鏡の焦点を調節するとアンジュレ ーターの最上流から最下流までの間で放射された自 発放射光のスポットとそのビームライン上の位置に よる違いが容易に観測できることが確かめられた。

これは、アンジュレーター中での電子ビーム直径 が 1mm 程度であるのに対して、自発放射光はローレ ンツ因子γの電子では 1/γrad 程度の広がりを持つた め望遠鏡の焦点が外れると放射光の像が大きくボケ て、結局ビームライン上の短い範囲の光だけが良好 なコントラストで結像して見えることによる。

## 4. 自発放射光観測光学系の構成

このように、アンジュレーター内の位置による自 発放射光のスポットの違いが確認できたので、十分 電子ビームをモニターすることが可能と考え、予備 実験に用いた光学系を元に、図1に示すような配置 で自発放射光観測光学系を製作した。光学系の構成 は以下のようになっている。

望遠鏡は3 台用い、アンジュレーター光をハーフ ミラーで分割して導入し、それぞれアンジュレータ ーの最上流、中央、最下流でのビームスポットを常 時観測するように焦点を合わせることにした。光学 系はアンジュレーターが設置された加速器室の隣に ある実験室で光学台の上に組み立てた。

この光学系にはアマチュア用として一般に販売されている天体望遠鏡とそのパーツを多用した。望遠鏡にはトミー製の BORG76ED(fl=500mm、F6.7)を用い、筒先に光量調節用 φ 52mm ND フィルターを取り付けられるレンズキャップを被せてある。CCD カ

メラはミントロン社製の MK-7482NB 1/4"カラーカ メラを用いている。

カメラの画角の中でビームスポットの位置を確認 できるよう、天体の高精度手動ガイドに用いるビク セン製ガイドアイピース GA-4 をカメラの前に挿入 しカメラの画面上に光量可変のスケールパターンを 表示させるようにしている。また、望遠鏡の直焦点 位置に CCD 面を置くと像が小さすぎるため、惑星な どの拡大写真撮影に用いる拡大投影用アダプターと 拡大用にビクセン製 20mm 接眼レンズを挿入し像を 約2倍に拡大している。

## 5. 光学系のアライメント

図2に望遠鏡周辺の配置を撮影した写真を示す。 望遠鏡のアライメントは FEL 共振器ミラーのアライ メントに使われている He-Ne レーザービームをその まま用いて行った。アライメントの手順は以下の通 りである。

まず、望遠鏡対物レンズの中心にレーザーのスポ ットがほぼ一致し、かつ対物レンズを通過して細く なったレーザービームが接眼部のほぼ中心を通過す るよう、途中のミラーと望遠鏡の向きを調整する。 これで粗調整が完了する。

次に、ガイドアイピースを取り付け、レーザービ ームが拡大用接眼レンズの中心を通過するよう望遠 鏡直前のハーフミラーを調整する。

最後に CCD カメラを取り付ける。FEL 共振器の最 上流にあるレーザー光入射窓にトレーシングペーパ ーを置いてレーザー光を拡散させ、そのスポットを 望遠鏡を通して CCD カメラに結像させ、像が CCD の画面に表示されるスケールパターンの中心に一致 するよう望遠鏡の直前にあるハーフミラーを調整す る。

このようにして、望遠鏡の光軸をアンジュレータ ー中の共振器ミラーの光軸に一致させられるので、



図2:光学台の上に組み立てられた望遠鏡周辺の構成とミラーの配置

電子ビームが放射する自発放射光のスポットをスケ ールパターンの中心に一致するよう電子ビームを調 整すると、電子ビーム軌道を FEL 共振器の光軸に-致させることができる。また自発放射光のスポット 形状は、ほぼ電子ビームの断面形状を表すと考えら れる。

## 6. 結果とまとめ

この光学系を用いて FEL 発振実験の際に観測した 第3次高調波の自発放射光を図3に示す。左側がア ンジュレーターの上流部分、右側が下流部分で発生 した第3高調波(波長 500nm)の光のスポットで、 CCD ビデオ画像を PC に取り込んでトリミングして ある。薄く赤いスケールパターンの最小円の直径は、 電子ビームのサイズに換算しておおよそ上流側で



上流部スポット 下流部スポット 図3:観測された高調波光のスポット

0.9mm、下流側で 0.7mm と見積もられている。上流 側下流側ともビームの位置が He-Ne レーザーの軸か ら若干ずれ、形状も非対称でそれぞれ異なることが 分かる。しかしこの状態でもミラーの調整により波 長 1.5µm の FEL が発振した。

電子ビームを調整すると、上流と下流では明らか に調整を反映して独立にスポットの形状や位置が変 化する。ビームサイズと位置の調整がこのスポット を参照しながら行えることから、アンジュレーター 中の電子ビームモニターとしてこの方法が有効であ ることが確認できた。

## 参考文献

- I.Sato, et al., "Advanced Status at LEBRA in Nihon University", Proceedings of the 25<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, July. 12-14, 2000, p24
   K.Hayakawa, et al., "Construction of the Infrared Undulator at LEBRA", Proceedings of the 25<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, July. 12-14, 2000, p56
   Y.Hayakawa, et al., "Observation of IR Spontaneous Radiation at LEBRA", Proceedings of the 25<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, July. 12-14, 2000, p56
- Accelerator Meeting in Japan, Himeji, July. 12-14, 2000, 5358
- p358
  [4] I.Sato, et al., "Design Report on PF Injector Linac Upgrade for KEKB", KEK Report 95-18 (1996) p286
  [5] 石渡謙一郎 他, "非破壊型ビームポジションモニター の開発研究", Proceedings of the 26<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2001
- [6] S.Benson, Private Communication



Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 483 (2002) 29-33



www.elsevier.com/locate/nima

# First lasing of LEBRA FEL at Nihon University at a wavelength of 1.5 µm

## Y. Hayakawa<sup>a,\*</sup>, I. Sato<sup>a</sup>, K. Hayakawa<sup>a</sup>, T. Tanaka<sup>a</sup>, H. Nakazawa<sup>b</sup>, K. Yokoyama<sup>b</sup>, K. Kanno<sup>b</sup>, T. Sakai<sup>b</sup>, K. Ishiwata<sup>b</sup>, A. Enomoto<sup>c</sup>, S. Fukuda<sup>c</sup>, S. Ohsawa<sup>c</sup>, K. Tsuchiya<sup>c</sup>, M. Kato<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Atomic Energy Research Institute, Nihon University, Narashinodai 7-24-1, Funabashi-shi, Chiba-ken 274-8501, Japan <sup>b</sup> College of Science and Technology, Nihon University, Narashinodai 7-24-1, Funabashi-shi, Chiba-ken 274-8501, Japan <sup>c</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Oho 1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, Japan <sup>d</sup> Institute for Molecular Science, 38, Nishigonaka, Myodaiji, Okazaki-shi, 444-8585, Japan

#### Abstract

The FEL system covering wavelengths from 800 nm to 5  $\mu$ m has been developed at Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) in Nihon University. The system consists of a conventional 125 MeV S-band linac and a planar undulator with the alternative field of 50 periods.

The first lasing of the system was achieved at the wavelength of  $1.5 \,\mu\text{m}$  using dielectric mirrors. Although the saturation of the FEL power has not been observed yet, amplification of the spontaneous radiation power by about  $10^8$  times has been obtained with the measurement using the InSb detector. The absolute power has been estimated to be a few mJ/macropulse.

An intense visible light has been observed frequently depending on the intensity of the fundamental FEL. The measured time structure of the phenomenon suggests that this is the radiation related with the formation of the microbunches in the electron beam. © 2002 Elsevier Science B.V. All rights reserved.

PACS: 41.60.Cr; 47.75.Ht; 29.17.+w

Keywords: FEL; First lasing: Electron linac; Near-IR

## 1. Introduction

Since 1994 a free electron laser (FEL) system based on a 125 MeV electron linac has been developed at Laboratory of Electron Beam Research and Application (LEBRA) of Nihon University [1,2]. In this project the FEL will be applied to the advanced studies on the various fields such as material science, biology and medical science. The construction of the FEL system for visible region was completed in 1997 and the spontaneous emission (SE) from the undulator was observed in 1998. The FEL in visible region, however, has not been achieved and permanent magnets of the undulator were seriously damaged due to

<sup>\*</sup>Corresponding author. Tel.: +81-47-469-5983; fax: +81-47-469-5490.

*E-mail address:* yahayak@lebra.nihon-u.ac.jp (Y. Hayakawa).

<sup>0168-9002/02/\$ -</sup> see front matter © 2002 Elsevier Science B.V. All rights reserved. PII: S 0 1 6 8 - 9 0 0 2 ( 0 2 ) 0 0 2 8 1 - 4

irradiation with electron beams and/or  $\gamma$ -rays. Thus a new magnet array was designed for lasing in infrared region (IR) instead of that in visible region. The undulator was reconstructed and IR radiation from it was observed in 2000 [3].

In order to realize the near-IR FEL various improvements on the linac have been performed. By many works on the stabilization of the RF driving system the electron beam macropulse with a duration of 20  $\mu$ s has become available for the FEL experiment at the beam current over 100 mA. As the result of these efforts the first lasing at a wavelength of 1.5  $\mu$ m was achieved on May 26th of 2001. This paper reports about the facility of LEBRA and details of the event.

# 2. Performance of a linac and an undulator for near IR

Layout of the 125 MeV linac and the FEL system is schematically shown in Fig. 1. The electron beam is extracted at 100 keV with the conventional thermal cathode DC gun. Neither sub-harmonic buncher (SHB) nor RF gun is used at the injector section. Instead of those special devices, the 7-cell traveling wave type prebuncher tube brings excellent bunch length [4,5]. There are three 4 m accelerating tubes in the linac regular accelerating section. The RF power is supplied using two klystrons. The RF phase has been stabilized by both feedforward and feedback methods. The electron beam is momentum analyzed in the 90° achromatic bending system at the upper section of the undulator.

A horizontally arranged planar undulator is chosen as an insertion device. At present the undulator has the alternative field of 50 periods and is set up for the FEL wavelength from 0.8 to

Table 1		
Parameters of the 125 MeV linac		
Beam energy	50–125 MeV	
Acceleration frequency	2856 MHz	
Thermal cathode	EIMAC Y646B	
DC gun voltage	-100  kV	
Beam pulse duration	20 µs	
Beam intensity	200 mA	
Peak current	5–20 A	
Repetition rate	12.5 Hz	
Normalized emittance	$20\pi$ mm mrad	
Energy spread	1%	

Table 2Parameters of the planar undulator

Undulator structure	Halbach
Period length	48 mm
Period number	50
Material of permanent magnets	Nd–Fe–B
<i>K</i> -value (rms)	0.57-1.2
Resonant wavelength	0.8–5 μm
Cavity length	6718 mm

 $5 \mu m$ . The specifications of the linac and the undulator are shown in Tables 1 and 2, respectively. The small signal gain of the FEL system calculated as a function of the *K*-value and the resonant wavelength is also shown in Fig. 2.

#### 3. First lasing at a wavelength of $1.5 \,\mu\text{m}$

For the FEL lasing experiment, a wavelength of  $1.5 \,\mu\text{m}$  was selected as the resonant wavelength. The dielectric mirrors with the reflection rate of 99.5% for the wavelength were prepared.



Fig. 1. Layout of the FEL system. KLY: klystron, PB: pre-buncher, B: buncher, AS: accelerator structure, BD: beam dump.



Fig. 2. Small signal gain expressed as functions of the K-value.



Fig. 3. 1.5  $\mu$ m FEL pulse shape. (a) First lasing. The solid and dashed line mean the FEL pulse shape and the beam current, respectively. (b) After adjustments of the optical cavity and the linac. The IR detector is saturated.

Therefore the round-trip loss of the optical cavity is 1%, which is in good agreement with the actual loss that estimated from the decay time of the accumulated SE.



Fig. 4. Measured FEL power expressed as amplification of the accumulated spontaneous emission.

The first lasing at LEBRA was achieved at the electron beam energy of 86.8 MeV, the undulator K-value of 0.92 and the macropulse beam current of 100 mA. The macropulse waveforms of the FEL measured using an InSb detector with the sensitivity of 40 000 V/W are shown in Fig. 3 together with the beam current ones obtained by a core monitor. After tuning of the optical cavity length and the parameters of the linac, the FEL power became so intense that the IR detector was saturated.

Fig. 4 shows the obtained FEL power expressed as amplification of the accumulated SE power and the beam intensity at that time. The amplification was estimated by the external fitting to the decay curve of the detector output signal. The reduction owing to an ND filter (ND-400) placed at the front of the detector window was taken into account. The FEL gain has no linearity to the average beam current over a macropulse. It suggests that in this system short bunch length is more essential than large average beam currents. The input RF power into the injector should be optimized to obtain enough beam bunching for larger beam intensity. The FEL power has increased and reached at least a few mJ per one macropulse, which is estimated by the calorimetric measurement. However, the saturation of the power has not been obtained yet up to the early part of August 2001.



Fig. 5. Pulse shape of visible region radiation measured using a Si photodiode. It is enhanced when the FEL pulse grows up.

#### 4. Enhancement of visible light

When the fundamental FEL became so intense as to saturate the IR detector with the ND filter, an intense visible light was observed with a telescope for monitoring the beam profiles. Since the light color obtained by a CCD camera is cyan, it seems to be the third harmonics of  $1.5 \,\mu\text{m}$ resonant wavelength.

In order to investigate this phenomenon the time structure of the visible light was measured using a silicon photodiode detector. The result of the measurement is shown in Fig. 5. The intensity of the light grows up rapidly at late part of the electron beam macropulse and its rise time is shorter than the fundamental FEL. Because of the fast decay there is little possibility that the accumulation of the higher harmonics in the optical cavity should cause this enhancement.

The shape of the signal suggests that the occurrence of the flush should be strongly dependent on the microbunches formed in the FEL process. Therefore, it is considered that the phenomenon should be the coherent radiation from the microbunches or the nonlinear harmonics discussed in recent theoretical works [6].

## 5. Problem

At present the linac is still unstable. The FEL power fluctuates frequently and after a while the lasing entirely strays off. The instability disturbs the measurements to obtain significant properties such as the spectrum. It is also hard to perform fine adjustments of the linac leading the FEL power to the saturation.

Main causes of the long-term instability are variations of the cavity length dependent upon the room temperature and slow reduction of the electron emission from the gun. In particular, latter is serious since variations of the beam loading at the injector affect the electron beam bunching.

On the other hand it is considered that the instability in the short period seems to be due to the staggers of the beam trajectory caused by fluctuations of the commercial electric power.

## 6. Summary

The first lasing at LEBRA was achieved at the wavelength of  $1.5 \,\mu\text{m}$ . It demonstrates the possibility of FEL using a conventional electron linac without an SHB and an RF gun. In other words, the high-performance prebuncher has potential to realize a low-cost FEL system. The stability of the linac, however, must be more improved to achieve the FEL power saturation and provide excellent laser beams for applications.

The intense visible light that seems to be due to the microbunches was observed. It is an interesting phenomenon and worth studying as a light source.

## Acknowledgements

This study has been financially supported by the Grant from Ministry of Education, Science, Sports and Culture to promote multi-disciplinary research projects since 2000.

## References

- I. SATO, et al., Proceedings of the 12th Symposium on Accelerator Science and Technolog, 1999, pp. 37–39.
- [2] K. Hayakawa, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 375 (1996) ABS25.
- [3] Y. Hayakawa, et al., Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, Vol. 25, 2000, p. 358 (in Japanese).
- [4] A. Asami, et al., Proceedings of the Fifth Linear Accelerator Meeting in Japan, Vol. 5, 1980, p. 71 (in Japanese).
- [5] K. Yokoyama, et al., Proceedings of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan, Vol. 24, 1999, p. 359 (in Japanese).
- [6] Z. Huang, K. Kim, Phys. Rev. E 6 (2000) 7295.

FREE ELECTRON LASERS 2001 M. Brunken, H. Genz, and A. Richter (Eds.) 2002 Elsevier Science B.V.

## Present status of the Near-IR FEL at LEBRA at Nihon University

K. Kanno<sup>a</sup>, I. Sato<sup>b</sup>, K. Sato<sup>b</sup>, K. Hayakawa<sup>b</sup>, T.Tanaka<sup>b</sup>, Y. Hayakawa<sup>b</sup>, H.Nakazawa<sup>a</sup>, K. Yokoyama<sup>a</sup>, T. Sakai<sup>a</sup>, K. Ishiwata<sup>a</sup>, H. Inokawa<sup>a</sup>, Y. Nakamura<sup>a</sup>, S. Ohsawa<sup>c</sup>, S. Fukuda<sup>c</sup>, S. Anami<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Graduate School of Science and Technology,Nihon University, 7-24-1 Narashinodai Funabashi Chiba 274-8501 Japan

<sup>b</sup>Laboratory for Electron Beam Reseach and Application, Nihon University, 7-24-1 Narashinodai Funabashi Chiba 274-8501 Japan

<sup>c</sup>High Energy Accelerator Reseach Organization(KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801 Japan

The FEL system at LEBRA (Laboratory for Electron Beam Research and Application) at Nihon University consists of a 125 MeV electron linac and an optical cavity system with a planar undulator, which has been designed to cover the FEL wavelength from 800 nm to 5  $\mu$ m. For the preliminary FEL lasing experiment the optical cavity system has been tuned to a wavelength near 1.5  $\mu$ m. With this system first lasing was observed in May 2001 after a series of improvements on the linac rf system, the injector and the regular accelerating section.

#### 1. Introduction

Since 1997 the FEL experiment has been performed using a 125 MeV electron linac at LEBRA (Laboratory for Electron Beam Research and Application) at Nihon University, as collaboration on a high quality electron beam between KEK and Nihon University[1,2]. In 1999 a serious degeneration was found in the undulator permanent magnets, which was caused by the intense radiation from the beam profile monitors and the vacuum duct on the FEL beam line. Then, in 2000 the permanent magnets were replaced with those having an undulator wavelength of 48 mm. After the improvements on the linac rf system, the injector and the regular accelerating section, the first lasing was observed at the FEL setup wavelength of 1.5  $\mu m$  in May 2001. In the following sections, results of the improvements on the performance of the linac are reported.

## 2. The LEBRA FEL linac

The linac is composed of a 100 kV dc gun, a prebuncher, a buncher and three 4 m long accelerating tubes. These components were moved from the PF injector section of KEK. The prebuncher is not a single cavity but a 7-cell  $2/3 \pi$  mode travelling wave tube. The electrons in the bunching phase are accelerated in the prebuncher, which is effective for the suppression of the emittance growth caused by the space charge force when the electrons are strongly bunched in the drift space and the buncher. The Mitsubishi PV3030A1 klystrons used were also moved from KEK. The nominal maximum rating of the rf pulse width for the klystron is 6  $\mu$ s. However, the klystrons have suffered the pulse width of 20  $\mu$ s in the operation at 20MW output and 12.5 pps by the improvement on the vacuum conductance around the rf window as mentioned in later section.

## 3. Improvement on the perfomance of the linac

3.1. Long pulse operation of the klystrons

The output rf from the klystron is transmitted by evacuated waveguides. A serious problem about the PV3030A1 klystrons was the dielectric breakdown occurred at the downstream side of the output windows. Once the breakdown occurred on the rf window, the vacuum in the waveguide decreased rapidly, then recovered

slowly in several seconds. Since the nearest ion pump was placed about 2 m downstream of the window, the conductance of the vacuum around the window was very poor. The vacuum degenerated by the breakdown around the window caused a new breakdown in the next rf pulse, thus the damage on the accumulated gradually and finally the window was broken. In order to recover the vacuum around the window in very short time, two 8 l/s ion pumps were added at the waveguide close to the window. Before the change of the vacuum system the operation with the rf pulse width of 20  $\mu$ s seemed to be very difficult to realize, but this change was quite successful to suppress the breakdown. Although the pulse width is much longer than the nominal rating, the routine operation of the klystron is currently performed with the rf pulse width of 20  $\mu s$  and the output peak power of 20 MW at the repetition rate of 2 Hz

## 3.2. Phase stability of the klystron driving rf system

The phase of the output rf from the driver rf amplifier changes considerably during the rf pulse duration, although only a small phase fluctuation can be allowed in case of FEL. Without any compensation of the phase fluctuation, after passing the bending magnets and the momentum slit the electron beam current was quite unstable. Then the phase control system has been applied to the fast  $\phi$ /A controller precedent of the rf amplifier. The compensation for the phase difference between the rf source and the rf amplifier output has been done by applying the phase control signal generated with a function generator to the fast  $\phi$ /A controller. The fluctuation of the phase in the whole rf pulse duration has been reduced to less than 1 deg. by this system.

## 3.3. Performance of the electron gun

The electron gun was the same as the one used at KEK to get a beam with a large peak current and short pulse, in which the EIMAC Y646E cathode was adopted. Therefore, the specification of the gun had not been optimized for the use in the FEL of LEBRA. The electron beam was strongly focused near the anode. Then the optimum shape of the Wehnelt electrode was designed for the cathode voltage of -100 keV and the emission current of 400 mA by a computer simulation using the EGUN code. A new electron gun has been fabricated on the basis of the result of the simulation. The cathode assembly has been replaced to EIMAC Y646B that has a smaller cathode area compared with Y646E. The emittance of the beam deduced from the result of the beam profile measurements has been reduced considerably. The normalized emittance obtained at the exit of the linac has been about 21  $\pi$ mm mrad, which is about 1/3 of that obtained for the old gun.

## 3.4. Perfomance of the injector and the regular section

In the beginning of the linac operation, the rf power for the injector, i.e. the prebuncher and the buncher, was divided from the klystron output using a 7.2 dB directional coupler. The directional coupler has been replaced to one that has a coupling of 6 dB, because the power applied to the buncher was not sufficient for the bunching of the beam with the current of 400 mA. Originally the high power if system associated with the second klystron, supplying the rf power to two 4 m accelerator tubes, did not equipped with a phase shifter. For easiness of the operation of the linac when the energy change is required, a phase shifter has been put in the waveguide system connected to the final 4 m tube.

#### REFERENCES

- T.Tanaka et al., Proceedings of the 19th International Free Electron Laser Conference and 4th FEL User's Workshop Beijing, China, August 18-22, (1997)103-104.
- T.Tanaka et. al., Proceedings of the 1st Asian Particle Accelerator Conference, KEK, Tsukuba, Japan March 23-27, (1998) 722-724.

## Status of Infrared Free Electron Laser at Nihon University

T.Tanaka\*, I.Sato, K.Hayakawa, Y.Hayakawa and K.Sato

Laboratory for Electron Beam Research and Application, Institute of Quantum Science, Nihon University, 7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501 JAPAN

\*) Corresponding author, tanaka@lebra.nihon-u.ac.jp

A free electron laser (FEL) system has been developed for the experiments of material, life, resource sciences and others at the Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) in Nihon University. The beam from a 125MeV electron linac was first introduced to the FEL system in 1998. We had encountered several difficulties especially in the electron beam stability for the long pulse operation of the linac which was required for a relatively short wavelength FEL system. In 2001 the first lasing of 1.5µm FEL was achieved at the electron energy of 86MeV using an undulator designed for the near infrared FEL. We could suppress the beam current fluctuations quite effectively by improving the stability of the phase of the klystron output RF and have succeeded in lasing. The current important subject is to improve the stability of the FEL lasing for the applications of the LEBRA FEL to various studies.

KEYWORD: infrared, free electron laser, electron linac, undulator

#### **1. Introduction**

The free electron laser (FEL) project at Nihon University was started in 1994 with cooperation from Tohoku University, KEK, ETL and PNC<sup>1</sup>). The project has been proposed to promote the application of infrared (IR) through ultraviolet (UV) FEL to the fields of material, life, resource and other sciences.

The specifications of the electron linac are listed in Table 1. The beam injection system and the regular accelerating section of the linac were moved from KEK Photon Factory positron injector linac as a part of collaboration on development of a high quality electron linac. The linac was constructed in the building that had been used for development of a 35MeV double-sided microtron<sup>2</sup>). In order to suppress construction costs, many power supplies and parts used in the microtron, the 100kV DC gun power supply, the gun high voltage terminal, the electromagnet DC power supplies and the high power DC supplies for the klystron modulators, have been recycled.

The first lasing with the FEL system in the Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) was achieved in May 2001 at the wavelength of  $1.5\mu m$  after considerable improvement of the linac performance. An exponential increase of the gain in the FEL has been obtained during the electron beam macropulse, but no evidence for the saturation of the light power has been observed. Present status and improvements on the LEBRA FEL system are reported in the following sections.

Table 1. Specifications for LEBRA 125MeV linac

	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	···
Accelerating RF frequency	2856	MHz
Klystron peak output RF power	30	MW
Number of klystrons	2	
Electron Energy	30~125	MeV
Energy spread (FWHM)	0.5~1	%
Macropulse beam current	200	mA
Macropulse duration	20	μs
Repetition rate	12.5	pps
Micropulse beam pulse length	3.5	ps
Micropulse beam current	20	Ā
Normalized beam emittance	20	$\pi$ mm.mr



Fig. 1. Outline of the first floor of LEBRA facility. There are 9 experimental rooms for the application to various fields, as indicated with numbers (1)-(9). The experimental facility was completed in 2001

#### 2. Overview of LEBRA facility

The facility of LEBRA is located in the Funabashi campus of Nihon University. The outline of the first floor is shown in Fig. 1. The facility is divided into two areas; the accelerator facility and the experimental facility.

The accelerator facility was originally constructed for research and development of a disk-and-washer accelerating structure and a circular microtron in 1982<sup>3)</sup>. In 1984, development of a CW 35MeV double-sided microtron was started as a research of a compact FEL electron accelerator sponsored by the Science and Technology Agency. The double-sided microtron was shut down in 1993, and then the addition to the accelerator facility was completed in 1994 for a new project, the study and application of FEL using a pulsed linac.



Fig. 2. The 125MeV electron linac viewed from downstream the accelerator. The linac was completed in 1997. Most of main components, the accelerating tubes, the vacuum manifolds and the focusing magnets were moved from KEK Positron Factory linac

Construction of the 125MeV electron linac started in 1996, and completed in June 1997. The FEL system was also constructed in the accelerator room. The picture of the 125MeV linac is shown in Fig. 2. The beam injection system of the linac has a conventional configuration consisting of the 100kV DC electron gun, the prebuncher and the buncher. However, the prebuncher is not a traditional single cavity.



Fig.3 Schematic drawing of the linac injector system. The EIMAC 646B thermal cathode is used for the 100kV DC gun. The injector has a conventional configuration except that the prebuncher consists of a 7-cell traveling wave tube.

but a 7-cell traveling wave tube in which the electrons are bunched and slightly accelerated <sup>4)</sup>. The configuration of the linac injection system is illustrated in Fig.3.

As shown in Table 1, the high power RF of 60MW is required for acceleration of electrons up to 125MeV, which is supplied by two klystrons. For this purpose, the klystrons of Mitsubishi PV3030A1 type were also moved from KEK, though already used for several years [5]. The klystron pulse modulators designed for the FEL linac have an approximate pulse duration of FWHM 30 $\mu$ s, where fluctuations of the pulse voltage can be suppressed to less than 0.1% of the flat top over 20 $\mu$ s by a remote control of every inductance coil in the pulse-forming network circuits from the control room. The first beam acceleration with the linac was achieved in the end of January 1998.

The experimental facility for IR to UV FEL was completed in March 2001. Each experimental room isolated from others according to the field of study has a separate FEL output port. A typical setup of the FEL output ports is shown in Fig.4. The FEL beam, guided through the vacuum duct set under the floor, is reflected upward, and finally extracted in the horizontal direction at the height of 900mm from the floor with the end mirror of the output port. Experiments using UV to X-ray beam are performed in the large experimental hall next to the accelerator room in order to avoid a large reflection loss of the short-wavelength photon beam power. In the experimental facility there are 9 experimental rooms, 5 data analysis and/or preliminary experimental rooms and 6 workrooms.



Fig.4 Setup of the FEL output port placed in every experimental room. The FEL guided through the pit under the floor is reflected upward, and then extracted in the horizontal direction with the end mirror at the height of 900mm from the floor.

#### 3. Performance of Linac

The specification of the linac RF pulse duration required for LEBRA FEL is 20 $\mu$ s at the maximum klystron peak output power of 30MW, but the nominal rating of the RF pulse duration for PV3030A1 klystrons is only 6  $\mu$ s at the peak power.



Fig.5 Performance of the stability of the RF phase and the electron beam current improved by the compensation for the RF phase fluctuations. The klystron output phases were measured using double-balanced mixers. The beam currents in the accelerator and the FEL beam line were measured using current transformers (CT). (a) RF phase fluctuations detected at the output of klystrons. Vertical scales: 3°/div for upper trace (klystron 1), 5°/div for lower trace (klystron 2). Horizontal scale: 4µs/div

(b) Reduction of fluctuations using the phase compensation systems. Scales are the same as (a).

(c) Beam current waveforms detected at (1) exit of the gun (upper rectangular trace), (2) exit of the linac (lower rectangular trace), (3) entrance of the undulator (narrow pulse) and (4) the Faraday cup (overlapped with (3)) when without RF phase compensation system. Vertical scales: 200mA/div for (1), 40mA/div for (2), 20mA/div for (3) and (4). Horizontal scale: 5 µs/div.

(d) Beam current waveforms corresponding to (c) when the fluctuations are suppressed within 1° as shown in (b). Approximately rectangular wave has been obtained in the FEL beam line. Scales are the same as (c).

There was no experience of operation at the duration of 20  $\mu$ s for PV3030A1 klystrons. From the consideration on the thermal and the dielectric strengths of the klystron output window, the immediate target of the linac operation was set as the maximum electron energy of 100MeV at the beam current of 200mA, which is sufficient for the experiment of lasing in near IR region. This beam condition can be satisfied by the peak output RF power of 20MW for each klystron. Thus, the ageing of the klystrons was started so as to exceed the output power of 20MW at the pulse duration of 20 $\mu$ s and the repetition rate of 12.5Hz, though there was no guarantee that the windows would not break even with such a long output pulse.

The operation of the linac was followed by serious problems around the RF windows and the klystron assembly tanks as reported elsewhere<sup>6)</sup>. After the increase of the

vacuum pumping in the wave guides close to the RF windows, the performance of the PV3030A1 klystrons has been much improved to satisfy the specification mentioned above. The breakdown of the heater transformer in the klystron assembly tank has been suppressed by the improvement on the structure and the materials of the heater transformer so that the dielectric strength could be increased.

In the early operation the quality of the electron beam from the linac was very low due to fluctuations of the RF phase during the macropulse. The phase fluctuations occurred mainly in the transistor RF amplifier that drives the klystron. Since the behavior of the fluctuations was different between two klystron-driving systems the final electron energy was considerably modulated in the long pulse duration, which led to a large decrease of the beam current and the beam pulse width when transferred into the FEL beam line. The phase fluctuations have been canceled by making a phase drift compensation system<sup>7)</sup>. The system consists of a fast phase shifter that is inserted upstream the RF amplifier and a function generator that produces a fixed phase modulating signal at every RF pulse. Given the fact that the time dependence of the phase fluctuations in the pulse duration is approximately reproduced at every RF pulse for the whole operation time in a day, the compensation for the phase drift has been successfully made.

Improvement of the RF phase stability and the electron beam current is shown in Fig.5, where the resultant waveforms are compared to those obtained with no phase compensation. The phase fluctuations during the pulse have been suppressed to less than 1° by this system. Also a slow phase drift caused by change in room temperature has been suppressed to less than 1° by incorporation of a slow RF phase feedback circuit. The beam current transported into the FEL beam line has formed a rectangular shape as shown in Fig.5-(d), which is the result of a great improvement on the uniformity of the electron beam energy achieved by the stabilization of the RF phase in the macropulse.

#### 4. Undulator and optical cavity

The FEL undulator consists of a planar Halbach type permanent magnet, where the electron beam is wiggled in the vertical plane. In the early phase of the linac operation, the experiment of lasing was attempted at a fundamental FEL wavelength of 482nm with the undulator magnet having parameters optimized to the FEL from the visible to the UV region.



Fig. 6. Degradation of the UV undulator permanent magnet. The peak fields measured using a Hall probe is shown with rectangular dots. The flat line shows the regular amplitude distribution of the magnet measured at the gap width of 11mm before installed. The closed circles and solid lines show the distribution of the residual radioactivity on the surface of the magnet (in arbitrary unit). The result of the measurement shows that the lower magnetic field corresponds to the higher residual activity. The vertical centerline indicates the position of a beam profile monitor set in the middle of the undulator. The electron beam was incident on the undulator from the left hand side.

However, the magnetic fields of the permanent magnet chips made of NdFeB were considerably decreased as a result of an intense gamma and/or neutron irradiation during the series of experiments<sup>8</sup>). The main irradiation was caused by the photo-luminescent beam profile monitors placed at the entrance, the middle and the exit of the undulator beam line.

The magnetic field distribution roughly measured using a Hall probe around every crest of the field is shown in Fig. 6 together with the residual radioactivity measured on the surface of the magnet chips. The result of the measurement indicates a significant degradation of the magnet chips around the monitors where the residual radioactivity is relatively high. The undulator vacuum duct with inner diameter of 7.6mm, corresponding to a narrow undulator gap width, was also the source of the radiation, since the duct was frequently bombarded with the electron beam during the adjustment of the beam transport system. The experiment of lasing at 482nm was once shutdown in 1999, since it was evident that the undulator was not effective for lasing any more.

Then, the undulator magnet was replaced with one newly designed for the IR FEL in order to realize the application of the IR FEL prior to the visible-UV region. The specifications of the IR FEL system are listed in Table 2. The minimum gap width of the IR undulator magnet, 29mm, has allowed us to increase inner diameter of the vacuum duct to 25.4mm. This gives a large tolerance of the beam orbit error compared to the previous one. The beam profile monitors around the undulator were removed to avoid the radiation damage to the magnet. Although there has been no beam profile monitor or beam position monitor in the FEL beam line, no serious problem has occurred in beam handling for the FEL experiment since the optimum parameters of the transport system were already confirmed.

Table 2. Parameters for LEBRA infrared FEL system using a Halbach type planar undulator.

ridioden cype planar andulator.		
Undulator period	48	mm
Number of periods	50	
Minimum gap width	29	mm
Maximum undulator field	0.33	Т
Maximum K-value	1.5	
Optical cavity length	6718.04	mm
FEL wavelength	5~0.8	μm

In the experiment of lasing, the FEL optical cavity has consisted of two dielectric multilayer mirrors instead of metal mirrors. Though the dielectric multilayer mirror is applicable only for a specific FEL wavelength due to a narrow bandwidth, there are advantages in initial mirror alignment with a laser or in monitoring the undulator radiation by the observation of harmonic components in the visible region. Metal mirrors are prepared for the use in the variable wavelength mode operation, which is necessary for the practical use of the FEL.

Each dielectric mirror has a reflectivity greater than 99.5% at a bandwidth of  $0.1\mu m$  centered at around  $1.55\mu m$ . The separation of the two mirrors is about 6718mm; 64

times the wavelength of the linac RF. The round trip time of photons between the mirrors is about 44.8ns. The picture of the mirror chamber downstream the undulator is shown in Fig. 7. The direction of the mirror is adjusted by the rotation of the mirror itself around two axes at every 10 $\mu$ rad with stepping motors, while the cavity length is adjusted by the movement of the mirror along the photon beam line at every 1 $\mu$ m with a stepping motor or more precisely with a piezo unit.



Fig.7. Photograph of the vacuum chamber for the mirror downstream the undulator.

#### 5. Observation of IR-FEL

Observation of the undulator radiation and IR FEL has been made with the undulator parameter and the electron beam energy adjusted for lasing at the wavelength of 1.5µm [9]. Under this condition, most of the harmonic components and about 0.5% of the fundamental component of the undulator radiation are transmitted into the mirror, and are then extracted through the sapphire view window out of the optical cavity system. The extracted photons are guided with mirrors into the large experimental hall next to the accelerator room as illustrated in Fig.8. The fundamental component is separated from harmonic components by using a cold mirror. The fundamental component is only detected with the InSb detector when the intensity is low, however, if the intensity is still high after the division by a half mirror it is detected with both the InSb detector and the HgCdZnTe detector simultaneously. The visible third harmonic radiation reflected with the cold mirror is focused to the color CCD camera mounted on a telescope that has been aligned with the undulator axis, which enables us to monitor the rough profile and position of the electron beam in the undulator.

The buildup of the optical power of the fundamental radiation in the optical cavity, which has been monitored with the InSb detector, is shown in Fig.9 together with the waveform of the electron beam current measured with a Faraday cup simultaneously. The experiment of lasing at the wavelength of  $1.5\mu$ m has been performed with the electron beam accelerated to 86MeV at the peak macropulse current of 100mA.

The energy spread of the beam has been restricted to FWHM 1% of the center energy with a slit downstream the first 45° bending magnet. The gap width of the undulator magnet has been adjusted so that the stored optical power could be maximized, which means that the wavelength of the fundamental component has been adjusted at around the center of the mirror bandwidth.



Fig. 8. Observation system for IR FEL lasing experiments. About 0.5% of the fundamental FEL ( $\lambda$ =1.5µm) and most of the spontaneous higher harmonics are transmitted into the dielectric multilayer mirror and extracted through a sapphire window from the cavity system.

From the consideration on the round trip of the spontaneous radiation and the lasing of the FEL in the optical cavity, the optical power detected after the round trip of n times (n=0,1,2,...) since the beginning of the uniform macropulse beam current can be roughly expressed as

$$V_n = AI_{\rm U} \left[ (1 - R) \left\{ C_{\rm L} \sum_{k=0}^n (1 + G)^k R^{2k} + C_{\rm A} \sum_{k=0}^n R^{2k} \right\} + C_{\rm T} \right], \quad (1)$$

where  $V_n$  is the output voltage from the detector amplifier given as an integration of successive radiations from the electron beam at 0th through *n*th round trip,  $I_U$  is the total intensity of the single path fundamental radiation proportional to the electron beam current, *A* is the coefficient including the detector sensitivity and the geometrical factor, *R* is the reflectivity of each mirror, and *G* is the FEL gain that is assumed constant during the macropulse, respectively. The number *n* is related to the elapsed time *t* since the beginning of the beam pulse as t = 44.8n ns.

In Eq.(1), it is assumed that all the photons having the wavelength in the mirror bandwidth are reflected with the reflectivity R at every mirror in the round trip. While being stored during the beam macropulse, the optical power is extracted by the transmission ratio of 1-R. On the other hand, the reflectivity for the other photons out of the bandwidth is simply assumed to be 0, which means that these photons are immediately extracted from the cavity with no round trip. Therefore, the spontaneous fundamental

radiation can be divided into three components, i.e. the component that contributes to FEL lasing  $(C_L)$ , the component that does not contribute to FEL lasing, in spite of accumulation in the cavity  $(C_A)$ , and the remainder that is not accumulated  $(C_T)$ . These components satisfy the relation

$$C_{\rm L} + C_{\rm A} + C_{\rm T} = 1 \tag{2}$$

Since the optical power accumulated in the cavity decays at a factor of  $R^2$  in every round trip of photons after the end of the macropulse beam, the decay curve observed in the detector output is expressed in term of the round trip number n as

$$V_n = V_{n_r} R^{2(n-n_f)}$$
(3)

where  $n_{\rm f}$  and  $\gamma_{n_{\rm f}}$  is the round trip number and the detector

output voltage at the end of the macropulse beam, respectively. The mirror reflectivity of 0.9958 has been obtained by the fitting of Eq.(3) to the decay curve in Fig.9 with the eye, which is consistent with the product specification. Buildup of the optical power shown in Fig.9 has been also fitted with Eq.(1) as a function of the fraction  $C_L+C_A$  by assuming that the FEL gain G is 0. The value of  $C_L+C_A$  has been estimated to be 0.86 from the fitting with the eye as shown by the solid line in Fig.9, where the absolute value of the detector output has been scaled with the coefficient A in Eq.(1).

The behavior of the stored optical power has been quite sensitive to the adjustment of the optical cavity length and the electron beam orbit. An example of a small enhancement of the optical power is shown in Fig.10. The waveform has been fitted with Eq.(1) as a function of the FEL gain G and the ratio between  $C_L$  and  $C_A$ , using the mirror reflectivity R, the coefficient A and the fraction  $C_T$  (= 1– $C_L$ – $C_A$ ) obtained by the above analysis.



Fig. 9 The buildup and decay waveform for the fundamental radiation ( $\lambda$ =1.5µm) observed with the InSb detector. The solid line shows the result of the fitting of Eqs.(1) and (3), where the fitted values are *R*=0.9958, *C*<sub>L</sub>+*C*<sub>A</sub>=0.86, *C*<sub>T</sub>=0.14 and *A*=2.3×10<sup>-4</sup>. The FEL gain *G* is assumed 0. The macropulse beam current *I*<sub>U</sub> is 98mA, corresponding to the waveform detected using a CT as shown in this figure. Vertical scales: 2mV/div for the InSb detector output, 20mA/div for the beam current. Horizontal scale: 4µs/div.



Fig. 10 Observation of a small enhancement of the optical power ( $\lambda$ =1.5µm), showing a peak at the end of the beam pulse. The FEL gain *G*= 0.0197 was estimated from the fitting of Eqs.(1) and (3) as shown by the solid line, where *C*<sub>L</sub>+*C*<sub>A</sub> was divided into *C*<sub>L</sub>=0.012 and *C*<sub>A</sub>=0.848 with other parameters unchanged. Vertical scales: 5mV/div for the InSb detector output, 20mA/div for the beam current. Horizontal

The result of the fitting with the eye is shown by the solid line in Fig.10, where the beam current has been assumed to be uniform over the pulse duration. From the fitting, the FEL gain G and the fraction  $C_{\rm L}$  of photons contributing to lasing has been estimated to be 0.0197 and 0.012, respectively.

On the basis of Eqs.(1), (3) and the parameters determined in the above fittings, the FEL gain has also been estimated for the lasing followed by a strong amplification of the optical power as shown in Fig.11, where the detector output voltage is plotted in logarithmic scale. The saturation of the detector output voltage seen in Fig.11 is not due to the saturation of the FEL power, but due to the saturation of the detector amplifier at around 4.5V. The solid line in Fig.11 shows the result of calculation using Eqs.(1) and (3) at G=0.0425. The behavior of amplification and decay of the optical power in the cavity is in good agreement with the result of calculation using the parameters determined by Figs.9 and 10. The result suggests that the fraction of the photons contributing to the FEL lasing can be assigned as a constant, although the gain is changed by the adjustment of the electron beam and the cavity mirrors.

In Fig.11, the peak optical power at the end of the beam macropulse is estimated to be about 1500 times the stored power of spontaneous emission when compared with Fig.9. The optical power monitored with the InSb detector has been changed by several orders of magnitude between successive pulses, corresponding to the change of the FEL gain at every electron beam macropulse. A strong amplification of the FEL was observed only once in several beam macropulses probably due to pulse-to-pulse fluctuations of the beam condition and/or the optical cavity length. Therefore, the stabilization and increase of the FEL gain is an important problem for the application to various studies.

The maximum FEL gain greater than 0.06 has been obtained in the other experiments at the macropulse beam current of about 40mA, which has also been estimated by the same analysis as mentioned above. The analysis suggests that the light power has been enhanced by a factor of  $10^6$  at the end of the beam pulse compared to the spontaneous power shown in Fig.9. At this time, the output signal of the InSb detector was significantly saturated. However, the behavior of the power simultaneously detected with the HgCdZnTe detector, having a low response of 0.08V/W with the active area of 1mm<sup>2</sup>, has shown an exponential increase of the power peaked at the end of the beam pulse. The saturation of the FEL power has not been achieved in the LEBRA FEL system.



Fig.11. A logarithmic plot of the optical power ( $\lambda$ =1.5µm) observed with the InSb detector when the power was strongly amplified. The output of the detector amplifier was saturated at around 4.5V. The FEL gain *G*=0.0525 was estimated from the fitting of Eqs.(1) and (3) with other parameters unchanged. The fitting curve shown by the solid line is peaked at the end of the beam pulse, which is in good agreement with the observed exponential increase and decay of the optical power.

#### 6. Summary

As the first phase of the FEL project at LEBRA, lasing of 1.5  $\mu$ m FEL has been achieved by using dielectric multilayer mirrors. In the series of lasing experiments, the maximum FEL gain of 6% has been obtained at the macropulse beam current of 40mA, but no saturation of the FEL power has been observed yet. In the next step, the mirrors will be replaced with gold plated mirrors to realize variable wavelength FEL from 0.8 to 5 $\mu$ m. The stability of the electron beam from the linac has been significantly improved by the compensation of the RF phase fluctuations.

The improvement of the stability of the FEL gain and power is required for its use in various studies. The beginning of the application of LEBRA IR FEL is scheduled for the latter half of 2002.

- 1) K. Hayakawa et al., Nucl. Instr. Meth. A375 (1996) ABS25.
- T. Tanaka, K. Hayakawa, K. Yoshida, O. Takeda, K. Sato, Y. Torizuka Proc. 1988 Linear Accelerator Conf., Williamsburg, Virginia, U.S.A., October 1988 p. 614.
- 3) T. Tanaka, K. Hayakawa, K. Tsukada, K. Sato, N. Nakamura, O. Takeda, M. Nishinaka, Proc. 1984 Linear Accelerator Conf., Darmstadt, West Germany, May 1984 p. 229.
- A. Asami, S. Ohsawa, I. Sato, J. Tanaka, M. Oyamada, Proc. 5th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Japan, August 1980 p. 71.
- S. Fukuda, S. Michizono, K. Nakao, Y. Saito, S. Anami, Nucl. Instr. Meth. A368 (1996) 561.
- 6) T. Tanaka, K. Hayakawa, I. Sato, K. Sato, Y. Hayakawa, K. Yokoyama, K. Kanno, T. Sakai, Proc. 2nd Asian Particle Accelerator Conf., Beijing, China, September 2001, to be published.
- 7) K.Yokoyama, Ph.D. Thesis, Nihon University, 2002.
- 8) S. Okuda, K. Ohashi, N. Kobayashi, Nucl. Instr. Meth. B94 (1994) 227.
- 9) C.A. Brau, Free-Electron Lasers, Academic Press, 1990 p. 10.

## Simultaneous measurement of the fundamental and third harmonic FEL at LEBRA

Yasushi HAYAKAWA<sup>1\*</sup>, Isamu SATO<sup>1</sup>, Ken HAYAKAWA<sup>1</sup>, Toshinari TANAKA<sup>1</sup>, Kazue YOKOYAMA<sup>1</sup>,

Takeshi SAKAI<sup>2</sup>, Kouichi KANNO<sup>2</sup>, Ken-ichiro Ishiwata<sup>2</sup>, Eiko Hashimoto<sup>2</sup>

1) Institute of Quantum Science, Nihon University, Narashinodai 7-24-1, Funabashi-shi, Chiba-ken 274-8501, Japan

2) College of Science and Technology, Nihon University, Narashinodai 7-24-1, Funabashi-shi, Chiba-ken 274-8501, Japan

Lasing of a free electron laser (FEL) at a wavelength of 1.5  $\mu$ m has been achieved at Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA), Nihon University. In order to study its characteristics in detail, a measurement system for the fundamental and the 3rd harmonic radiation was set up. In this system the visible and the infrared light beams are separated from each other using a commercial cold mirror which is a kind of dielectric multi-layer mirrors. The system made it possible to obtain several FEL parameters simultaneously, such as the yield, the beam profile and the spectrum. It will be useful for the investigation into a phenomena that seems to be the non-linear higher harmonics discussed in recent study on the self amplified spontaneous emission.

KEYWORDS: IR-FEL, electron linac, higher harmonics, SASE, measurement system

#### 1. Introduction

At Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) of Nihon University a free electron laser (FEL) system has been developed since 1994.<sup>1)</sup> The FEL system of LEBRA consists of an S-band electron linear accelerator (linac), a planar undulator and an optical cavity. The specification of these devices is shown in Table I. The system has been designed so as to cover the wavelength range from  $0.8 \,\mu\text{m}$  to  $5 \,\mu\text{m}$ . At present multilayer dielectric mirrors, of which reflectance at  $1.5 \,\mu\text{m}$  is 99.5 %, are used for the optical cavity. As the result of various improvements in the FEL system, the first lasing at a wavelength of  $1.5 \,\mu\text{m}$  was achieved in  $2001.^{2,3}$ 

Owing to the property of the multi-layer mirrors, the transmittance of the 3rd harmonic spontaneous emission (SE) is considerably higher than that of the fundamental. In the present case, the fundamental is infrared region (IR) light and the 3rd harmonics is in the visible region. Since a detector for near-IR generally has some sensitivity for the visible light, it is necessary to filter out the higher harmonics from the FEL beam. Fortunately, an optical device to separate the visible light from near-IR is commercially available. The device is called cold mirror. In addition to filtering for the IR detector, the separation of the fundamental and the 3rd harmonic SE has a great merit that the information of the electron beam profile is obtained from the observation of the harmonics. Thus, a cold mirror was inserted in the light beam line and a few telescopes with charge-coupled device (CCD) video cameras were arranged downstream.

During the measurement of the FEL at LEBRA with the above system, an interesting phenomenon was found. When the gain of the fundamental FEL became large, the strongly enhanced 3rd harmonic radiation was observed. The phenomenon is probably related with the non-linear harmonics discussed in recent studies of the self amplified spontaneous emission (SASE).<sup>4,5)</sup> For investigating the phenomenon in detail, the measurement Table I. Specification of the linac and the FEL generator at LE-BRA.

Electron linac	-
beam energy	$50-125{ m MeV}$
acceleration frequency	2856 MHz
beam pulse duration	$20 \ \mu s$
beam intensity	200 mA
repetition rate	$12.5~\mathrm{Hz}$
normalized emittance	$20\pi \text{ mm mrad}$
Planar undulator	
magnet array type	Halbach
material of magnets	Nd-Fe-B
number of periods	50
total length	2400  mm
K-value (rms)	0.65 - 1.1
Optical cavity	
cavity length	6718 mm
mirror type	multi-layer or metal coat

system for the FEL has been upgraded so as to obtain several parameters of the FEL simultaneously.

In this paper the specification of the simultaneous measurement system for the fundamental and the 3rd harmonic radiation is described and the results of the preliminary measurements are shown.

## 2. Measurement system for the FEL

2.1 Layout of the measurement system

For study of the FEL at LEBRA, the light beam extracted from the optical cavity of the FEL system has been transported to the next room through the 2 m concrete shield. Several Al coated mirrors are used in the light pass so as to guide near-IR and the visible light together. Figure 1 shows the schematic layout of the measurement system.

<sup>\*</sup>E-mail address : yahayak@lebra.nihon-u.ac.jp


Fig. 1. Layout of the measurement system for the FEL at LE-BRA.

At the exit of a tunnel through the shield wall a cold mirror, which is a kind of dielectric multi-layer mirrors and commercially available, has been placed to separate the visible light from near-IR light. The specification of the cold mirror is shown in Table II. The reflectance and the transmittance of the mirror were measured using an infrared He-Ne laser (1.52  $\mu$ m) and an Ar laser (488 nm) units.

The IR beam passed through the cold mirror is split into two beams by use of a polka-dotted half mirror. The half mirror has a merit that the reflectance dose not depend on the wavelength of the incident light. One IR

Table II. Specification of the commercial cold mirror of which incident angle is 45°.

type	dielectric multi-layer
size	$50~\mathrm{mm}$ $ imes$ $50~\mathrm{mm}$
thickness	$3.3 \mathrm{mm}$
base plate	boro-float glass
for 1.5 $\mu m$ wavelength	
reflectance	$\sim 10~\%$
transmittance	$\geq 80~\%$
for 488 nm wavelength	
reflectance	$\sim 95~\%$
transmittance	$< 1 \ \%$

Table III. Specifications of the IR detectors used at LEBRA.

InSb detector	
spectral range	$1-5.4~\mu{ m m}$
active area	$1 \times 1 \text{ mm}^2$
responsivity	> 40000  V/W
$\mathbf{bandwidth}$	DC to 20 $MHz$
HgCdZnTe detector	
spectral range	$1-12~\mu{ m m}$
active area	$1  imes 1  ext{ mm}^2$
responsivity	0.08 V/W
bandwidth	DC to 200 MHz
Pyroelectric power-meter	
spectral range	$0.19-20~\mu{ m m}$
active area	$24 \times 24 \text{ mm}^2$
responsivity	$5.34 \mathrm{~V/J}$
bandwidth	$< 20 { m ~Hz}$

beam is led to a high-sensitive IR detector and another is led to a low-sensitive one or a calorimetric power-meter.

On the other hand, the visible light beam reflected by the cold mirror is transported to a measurement system on the optical bench. There are three telescopes, a streak camera, a spectrometer and a detector for the visible region on the bench. For the simultaneous measurement the visible light beam line is divided into three lines using quartz glass mirrors, of which reflectance and transmittance are both 1/3.

#### 2.2 Detectors for near-IR

In order to detect the fundamental radiation in near-IR, a liquid  $N_2$  cooled InSb detector is used. Because of its high-sensitivity the detector is useful for monitoring the fundamental radiation accumulated in the optical cavity. The behavior of the accumulation provides significant information for the adjustment of the linac and the optical cavity. For measurements of the intense FEL beam a fast HgCdZnTe detector with low-sensitivity and a pyroelectric power-meter for a pulsed laser are equipped. The specification of the detectors is shown in Table III.

#### 2.3 Monitoring of the beam profile

The beam profile of the 3rd SE is useful information on the condition of the electron beam in the undulator section. Thus, a telescope with a CCD video camera, which is a conventional and low-priced one, has been placed on the one of the visible light beam lines.<sup>6</sup>) The images obtained from the monitoring system suggest whether the trajectory of the electron beam is adequate for FEL lasing.

In addition to the primary aim, the monitoring system brought detection of a phenomenon that the 3rd harmonic radiation was enhanced when the fundamental FEL was strongly lased.<sup>2,3)</sup> Figure 2 shows the light beam profiles of the 3rd harmonics, where a) and b) are the images of the normal and the enhanced radiation, respectively. Monochromatic feature of the light color suggests that the phenomenon is a kind of the coherent radiation.<sup>7)</sup>



Fig. 2. a): It is a beam profile of the undulator 3rd harmonic spontaneous radiation. b): When the fundamental FEL is strongly lased, the harmonics is also enhanced.

#### 2.4 Photo-diode detector for visible region

In order to investigate the time structure of the enhanced 3rd harmonic radiation a Si photo-diode detector for the visible light has been installed into the telescope. The pulse shape obtained with the detector is shown in Fig. 3 which also includes the signals of the InSb IR detector and the electron beam current monitor as the reference data.<sup>3)</sup> It indicates that the visible flash occurs at the latter part of the macropulse and its gain is larger than that of the fundamental FEL. Also the fast decay time of the signal means that the phenomenon is not due to the ordinary FEL process which results from the accumulation in the optical cavity but due to the amplification in single-pass like the SASE. Therefore, the non-linear harmonics of the SASE process is one of the candidates for the cause of the flash.



Fig. 3. Pulse shapes of the fundamental FEL, the 3rd harmonics and the electron beam current.

#### 2.5 Spectrometer with a CCD camera

The spectroscopic analysis is one of the most considerable methods to study the 3rd harmonics enhancement. Therefore, a spectrometer has been introduced into the measurement system. It is a Czerny-Turner type scanning monochromator with a dual grating assembly, which has a 600 G/mm and a 300 G/mm gratings. Due to the grating assembly, the monochromator has the potential to cover the wavelength range up to 5.2  $\mu$ m. Also there are two alternative exits in the optical pass of the monochromator. One of those has a slit assembly for scanning measurements and another is equipped with a back-illuminated thermoelectric cooled CCD camera,<sup>8</sup> which has a responsivity for the light of wavelengths



Fig. 4. Spectra of the 3rd harmonic radiation. The dashed line and the solid line describe the spectra of the normal and the enhanced radiation, respectively.

from 200 nm to 1.1  $\mu$ m. Imaging of the SE spectrum by the use of the CCD for spectroscopy synchronized with the beam macropulse of the linac. The system is useful for the measurements of the 3rd harmonic enhancement because the phenomena is not stable between the macropulses with respect to the light yield.

In Fig. 4 the preliminary result measured using the spectrometer is shown. It indicates that the enhanced 3rd harmonics is superior to the normal SE not only as to the intensity but as to the monochromaticity.

In addition, the spectral shape of 3rd harmonic SE has the information on the undulator condition. It is useful for checking the reduction of the undulator magnetic field due to the radiation damage.

#### 2.6 Measurement of the bunch-length with a streak-tube.

A streak camera has been also arranged to measure the bunch-length of the electron beam from the linac by the observation of the undulator 3rd harmonic SE. Since the measurement of the bunch-length requires the light beam with high luminosity, it is performed alternatively to other three measurements for the visible light beam. Figure 5 shows a typical result of the bunch-length measurement. Although the streak-tube is of old type and the time resolution of the system is not so excellent, the measurement is useful for confirming the performance of the linac injector.



Fig. 5. Typical time structure of the electron beam bunching. It was measured by use of the streak-tube with the CCD camera.

#### 3. Summary and future

The measurement system for the fundamental and the 3rd harmonic radiation has been set up. Separation of the IR and the visible light beams using the cold mirror has made it possible to monitor the intensity of the fundamental FEL and the 3rd harmonic SE, the electron beam profile in the undulator and the spectrum of the 3rd harmonics simultaneously. These parameters are useful for adjustment of the FEL system such as the linac and the optical cavity. Owing to the use of the measurement system, the phenomenon that seems to be related with the non-linear harmonics of SASE has been observed.

The improvement in the system has been planned for more detailed study of the fundamental FEL and the 3rd harmonics enhancement. For instance, the equipment of a pockels cell (Q-switch) will have advantages in the investigation in the transition of the enhancement. Moreover, an imaging device having the sensitivity for near IR has been expected to be installed into the spectrometer system for quick measurements of the fundamental SE and FEL spectra.

#### Acknowledgement

This study has been financially supported by the grant from Ministry of Education, Science, Sports and Culture to promote multi-disciplinary research projects since 2000.

- T. Tanaka, et al.: FREE ELECTRON LASERS 1997, Elsevier Science B.V. (1998) II-103.
- I. Sato, et al.: The 13th Symposium on Accelerator Science and Techniques, Osaka, Japan, (2001) 117.
- Y. Hayakawa, et al.: Nucl. Instrum. & Methods A 483 (2002) 29
- 4) Z. Huang and K. Kim, Phys. Rev. E 6, (2000) 7295.
- H. P. Freund, S. G. Biedron, S. V. Milton: Nucl. Instrum. & Methods A 445 (2000) 53.
- T. Tanaka et al.: Proc. of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, (2001) 246 (in japanese).
- S. V. Benson et al.: Proc. of the 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago, (2001) 2745.
- Y. Hayakawa et al.: Proc. of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan, (1999) 368 (in japanese).

# PROCEEDINGS OF THE 27<sup>th</sup> LINEAR ACCELERATOR MEETING IN JAPAN

# AUGUST 7-9, 2002

# Kyoto, Japan

URL http://lam27.iae.kyoto-u.ac.jp



Institute of Advanced Energy, Kyoto University Institute for Chemical Research, Kyoto University

# FEL 発振によって強調された3次高調波の測定

橋本 英子<sup>1,A)</sup>、早川 恭史<sup>B)</sup>、佐藤 勇<sup>B)</sup>、早川 建<sup>B)</sup> 田中 俊成<sup>B)</sup>、横山 和枝<sup>B)</sup>、菅野 浩一<sup>A)</sup>、境 武志<sup>A)</sup>、石渡 謙一郎<sup>A)</sup>、中尾 圭佐<sup>A)</sup> 藤岡 一雅<sup>A)</sup>、村上 琢哉<sup>A)</sup>、長谷川 崇<sup>A)</sup>、宮崎 慎也<sup>A)</sup>

> <sup>A)</sup>日本大学大学院 理工学研究科 量子理工学専攻 〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1
>  <sup>B)</sup> 日本大学 量子科学研究所 電子線利用研究施設 〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1

#### 概要

日本大学電子線利用研究施設(LEBRA)では可視光 であるアンジュレータ放射光の3次高調波がFEL発 振した時に強調される現象が観測された。そこで、 この現象を調べるためにスペクトルを解析した。光 のスペクトルは2つのピークから構成されており、 電子ビームが1つのマクロパルス内に2つのエネル ギーピークを持つと考えられる。さらに、2つのマ クロパルス内で加速器の調整次第でどちらのピーク からも FEL 発振を生ずることがわかった。

# 1. はじめに

日本大学電子線研究施設(LEBRA)では、短波長自由 電子レーザー発振を目指し、125Mevの電子線形加速 器を基盤とした波長可変な単色光源の開発を目指し、 近赤外から可視領域までの FEL の開発を進めている。 2001 年に,波長 1.5 μm での FEL 発振に成功した。

我々は、FEL の基本的特性を調べるため、測定系 の整備をすすめ、高調波スペクトルの測定、マクロ パルス内での増幅の様子を調べている。現在、FEL の強度は光共振器に蓄積される自発放射光の約 10<sup>®</sup> 倍に達しているが、しかし、FEL の飽和に至ってい ない。

光共振器の反射鏡は誘電体多層膜からなっている。 高反射率の波長範囲が 200nm 程度、レーザーが発振 する基本波長1.5μm 付近は、99.5%の反射率であ る。基本波発振が強くなると、0.5μ m波長の可視 光強度が3次高調波の自発光強度の 10~10<sup>5</sup> 倍にな る現象を観測した。

# 2. アンジュレータと光共振器の仕様

FEL発生装置は加速器とFEL発振を行うアンジ ュレータ及び両端にミラーを配置した光共振器から なる。現在のシステムは波長 0.8~5 µ m の近赤外 領域をターゲットとしている。リニアックとFEL 表1 リニアックと FEL 発生装置の仕様

Electron linac	
beam energy	50-125 Mev
acceleration	2856 MHz
beam pulse duration	20 $\mu$ m
beam intensity	200 mA
repetition rate	12.5 Hz
normalized emittance	20 $\pi$ mm mrad
Planar undulator	
magnet array type	Halbach
material of magnets	Nd-Fb-B
number of period	50
total length	2400 mm
effective K-value	065-1.1
Optical cavity	
cavity length	6728 mm
mirror type	multi-layer or metal coat

発生装置のパラメータを表1に示す。

# 3. 測定システムの概要

FEL スペクトルの測定システムを図1示す。トン ネルの入り口のコールドミラーによって赤外である FEL 基本波と可視であるアンジュレータ放射光の2 次、3 次高調波に分けられる。赤外である基本波 (FEL)は HgCdZnTe 赤外線検出器、InSb 赤外線検出 器によって観測される。

同時に測定される可視光の輸送ラインは、石英ミ ラーを使用することによって CCD カメラ、スペク トルメータ、フォトダイオードの3本のビームライ ンに分割され、ビームプロファイルの観測、フォト ダイオードによる強度測定、スペクトル分光を同時 に行うことが可能である。LEBRA では、2mのコン クリートのシールドを通って隣接される実験室まで 輸送される。また、分光器では、分光した像を加速 器に同期した冷却 CCD カメラで取得している。そ れによって、マクロパルスあたりのスペクトルを得 る。

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> E-mail: hashimoto@lebra.nihon-u.ac.jp







# 4. 放射光のスペクトルの計測結果

#### 2.1 測定結果

上記のシステムで、FEL の測定で興味ある現象が 見つかった。このときの電子ビームのエネルギー 86.8Mev で行ったときの実験データである。CCD カ メラで可視光フラッシュ(3 次高調波)を目撃した。こ れは、FEL 発振に伴い急激に増幅していることがわ かった。この現象の時間構造を測定するため、Si フ ォトダイオードを望遠鏡の接眼部につけ測定した。 これにより得られたデータを図2に示す。FEL 基本 波のゲインが大きくなった時にのみ、この増幅が確 認された。増幅した時のゲインが基本波 FEL よりも 大きいことから、その現象は非線形高調波と呼ばれ る現象ではないかと考えられる。

# 2.2 スペクトル分析

測定によって得られたスペクトルを図3に示す。 から得られたデータより分析した結果を図3に示 す。2つのピークが重なったような形状をした自発 放射3次高調波が、増幅するとき決まった波長で発 振せずに、ある波長幅で発振していることが分かっ た。その間隔Δ λ=1.9nm である。これよりアンジュ レータの自発光の式

$$\lambda = \frac{\lambda_w}{2\gamma^2} \left\{ 1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2 \theta^2 \right\} \quad (1)$$

(1)から $\theta = 0$ の場合、yが $\Delta y$ シフトしたときの 波長のずれ $\Delta \lambda$ は

$$\lambda + \Delta \lambda = \frac{\lambda_w}{2(\gamma + \Delta \gamma)^2} (1 + \frac{K^2}{2}) (2)$$
$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta \gamma}{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\Delta \gamma}{\gamma}} - 1} (3)$$
$$\frac{\Delta E}{E} = 0.2\% (4)$$

光のスペクトルは2つのピークから構成されて おり、電子ビームが1つのマクロパルス内に2つの エネルギーピークを持つと考えられる。さらに、2 つのマクロパルス内で加速器の調整次第でどちら のピークからも FEL 発振を生ずることがわかった。 (4)式より、電子ビームのエネルギー差ΔE=0.168Mev である。この原因として、1つ目に、オーバーバン チングによる可能性も挙げられる。2つ目にパルス の途中で位相がずれていることが挙げられる。この ような、不安定なビームの状態であっても加速器の 調整によって発振しうることが増幅した高調波ス ペクトルから分かる。また、最近 LEBRA において 実験中,基本波の発振が途中で挫折する現象が確認

されている(図 4)。このことは、後者の原因とも結び つくのではないかと思われる。



図4 フォトダイオードで3次高調波を測定し たときのビーム電流と赤外領域の FEL。基本波 FEL が増幅過程途中、挫折している。

# 5. まとめと今後の課題

2つのピークを持つビームの状態をさらに分析し、 原因を探る。また、光のスペクトルを使って電子の バンチの様子、位置の計測するシステムを確立する 予定である。

#### 6. 参考文献

- [1]Y.Hayakawa.,et.,Proc.of FEL Conf.DarmstadtGermany
  [2]T.Tanaka,et.,Proc.of 26<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan,246(2001)
  [3]H.Nakazawa et al.,Proc. Of 23th Linear Accelarator Meeting in Japan,84(1998)
  [4]Z.Huang et K.Kim Phys. Berg E(2)(2000)
- [4]Z.Huang and K.Kim, Phys. Rev. E62.(2000)

# 日大 FEL の現状と光源実用化に向けた改良

早川 恭史<sup>1,A)</sup>、佐藤 勇<sup>A)</sup>、早川 建<sup>A)</sup>、田中 俊成<sup>A)</sup>、横山 和枝<sup>A)</sup>、境 武志<sup>B)</sup>、菅野 浩一<sup>B)</sup>、 石渡 謙一郎<sup>B)</sup>、橋本 英子<sup>B)</sup>、中尾 圭佐<sup>B)</sup>、藤岡 一雅<sup>B)</sup>、村上 琢哉<sup>B)</sup>、長谷川 崇<sup>B)</sup>、宮崎 慎也<sup>B)</sup> <sup>A)</sup>日本大学量子科学研究所 電子線利用研究施設

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 <sup>B)</sup>日本大学理工学研究科 量子理工学専攻 〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1

#### 概要

日本大学電子線利用研究施設では、2001 年 5 月に 自由電子レーザ (FEL)発振を達成して以来、強度の 増強と安定化に努めてきた。共振器に誘電体多層膜 ミラーを用いることによって、シングルパスでの現 象と思われる 3 次高調波の増幅の観測などの成果が 得られたが、電子ビームの不安定性や共振器長の変 動によって安定な FEL 発振はまだ得られていない。

FEL を応用実験のために各実験室に輸送・分配す る光ビームラインの整備を進めているが、可変波長 光源として光を供給するには共振器ミラーを現在の 多層膜から金属ミラーに交換する必要がある。これ に伴って、アライメント及びガイド用のレーザを FEL 共振器に導入するため、キューブ型ビームスプ リッターを用いることにした。

#### 1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設(LEBRA)では、2001 年5月に波長1.5µm での自由電子レーザ(FEL)の 発振に成功した<sup>[1]</sup>。加速器として125MeV 電子リニア ックを用いているが、これは熱陰極 DC 電子銃を用 いており、入射器にサブハーモニックバンチャーを 使用していない、一般的なリニアックである。その ため、FEL 発振は容易ではなかったが、RF 窓の真空 強化によるクライストロンの長パルス化、高速移相 器を用いた RF アンプ位相変動の補償などによって リニアックの性能が向上し、マクロパルス幅 20µs の ビームを安定に供給することが可能となった。この ことが FEL 発振の成功に大きく寄与している<sup>[2,3]</sup>。

ファーストレイジング以降、リニアックのさらな る安定化に努めるとともに、得られる FEL の特性に ついて調べるために様々な測定を行ってきた。FEL ゲインの向上は見られたが、発振はまだパルス間で 不安定であり、FEL 利得の飽和は達成されていない。

現在は FEL 発振の達成とその基本特性の研究を目 的として波長 1.5µm をターゲットとした誘電体多層 膜ミラーを共振器ミラーとして用いている。波長可 変性を実現するためにはこれを金属ミラーに交換す る必要がある。また、アライメントシステムもこれ に適合したものに改良しなければならない。

# 2. LEBRA 近赤外 FEL の仕様

LEBRA の FEL システムは、125MeV S-band 電子 リニアックと平面アンジュレータ・光共振器で構成 されている。当初は可視光領域での FEL を計画して いたが、アンジュレータ磁石列が放射線ダメージに より減磁してしまったため、新たに近赤外用の磁石 列を製作し、現在使用している<sup>[4]</sup>。このシステムの仕 様を Table1 に示す。

電子リニアックの入射器には RF 電子銃やサブハ ーモニックバンチャーのような特殊な装置は導入し ていないが、7 セル型プリバンチャーの効果により比 較的短いバンチ長を実現することができる。

現在のところ、共振器ミラーとして誘電体多層膜 ミラーを用いている。これは FEL 発振達成を目標と してアライメントや測定のしやすさを優先させたも ので、波長 1.5µm をターゲットにしている。このプ ロジェクトの目的は FEL を波長可変な光源として実 用化し実際に応用研究に使用することであるので、 本来は金属コートミラーを使うことになっている。 金属ミラーの使用により、波長 0.8µm-5 µm の近赤 外領域をカバーすることが可能となる。

Table 1: LEBRA-FEL の仕様

電子ビームエネルギー	50 – 125 MeV
加速周波数	2856 MHz
マクロパルス幅	20 µs
繰り返し	12.5 Hz
ビームバンチ長	3.5 - 10  ps
アンジュレータ周期長	48 mm
周期数	50
K值 (rms)	0.65 - 1.1
共振器長	6718 mm
FEL 基本波波長	$0.8 - 5  \mu m$

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> E-mail: yahayak@lebra.nihon-u.ac.jp

現在、4 セットの共振器ミラーが用意されている。 Table 2 はそれらの仕様である。FEL 発振を達成した のは誘電体多層膜ミラー1であり、それをそのまま 使い続けている。金属コートミラーの皮膜には、赤 外光に対する反射率に優れている Au を採用した。

Table 2: 共振器ミラーの仕様		
ミラーの直径は全て 25mm		
誘電体多層膜ミラー1		
曲率半径	4.0 m	
反射率@1.5µm	0.995	
誘電体多層膜ミラー2		
曲率半径	4.5 m	
反射率@1.5µm	0.995	
Au 皮膜ミラー 1		
曲率半径	3.681 m	
光取り出し穴直径	0.5 mm	
Au皮膜ミラー2		
曲率半径	4.5 m	
光取り出し穴直径	0.2 mm	

ち上がっていくイベントが頻繁に観測されることも あり、RFの位相変動などがこの不安定性の原因とし て考えられる。

また、現在使用している共振器ミラーの曲率半径 が短いので、光と電子ビームが安定に相互作用する ためにはビーム軌道の安定性に関してシビアである。 電源変動によるビーム軌道のふらつきによって FEL の発振が不安定になっている可能性もある。



図1:赤外検出器(InSb)出力 1パスあたりの FEL ゲインは 9.5%、 共振器ロスは 2.5%

#### 3. 近赤外 FEL の現状

LEBRA において 2002 年 6 月現在までに FEL 発振 に成功しているのは多層膜ミラー 1 を用いた、波長 1.5µm 近傍のみである。FEL は高調波とともに下流 の共振器から取り出しているので、コールドミラー と呼ばれる光学素子を用いて赤外基本波と可視高調 波を分離し、測定している<sup>[5]</sup>。この測定系で高調波 SASE と思われる現象の観測にも成功している<sup>[1]</sup>。

#### 3.1 FEL ゲインとパワー

赤外の基本波の測定には高感度の InSb 検出器を用 いている。図1はこの検出器で FEL を測定したとき のシグナルである。FEL 発振をしているために光強 度が強く、検出器は飽和してしまっている。このと きの FEL ゲインと共振器のロスはシグナルの立ち上 がりと減衰から見積ることができる。このケースで は、1 パスあたりの共振器ロスは 2.5%であり、ネッ トのゲインは 9.5%である。現在、最大で 10%前後の ゲインが得られている<sup>[6]</sup>。しかしながら、これまでの ところ FEL ゲインの飽和は、まだ観測されていない。

パワーメータ(焦電素子タイプ)を用いて、マク ロパルスあたりの FEL パワーの測定を行ったところ、 図1の場合で約1mJ であった。マクロパルス内での 平均パワーに換算すると、50W に相当する。

#### 3.2 パルス間不安定性

FEL の発振は達成したが、その FEL ゲインはマク ロパルス間で大きく変わり、場合によっては発振が 間歇的になる。FEL の増幅が途中で挫折し、再び立

#### 3.3 長時間オペレーションに伴う不安定性

電子銃周辺でのチャージアップが原因と思われる、 ゆっくりとしたエミッションの減少とそれに続く放 電によって、FEL 発振を長時間維持するのが困難で あった。しかし、カソード電極の交換によりこの問 題はほぼ解消された<sup>[7]</sup>。

室温の変化により、真空ダクトやコンクリート壁 が伸縮して共振器長が変動してしまう。図2は FEL 発振を維持するために必要な共振器長の変化を室温



図2:室温の変化と共振器長の相関 実線:共振器長の変化,破線:室温



図3:金属ミラーに対応した光学アライメント系

と伴にプロットしたものである。共振器長の変化は ピエゾ素子の印加電圧から較正している。図のよう に共振器長は室温に追随しており、その変化率は共 振器 1m あたり約 0.8µm/℃ であった。これはコンク リートやステンレスの線膨張率の 1/10 程度であり、 室温に直接従う膨張を見ているわけではない。建屋 が土に埋まっているため、コンクリート内部の温度 変化とそれに伴う膨張は室温変化に比べかなり抑え られていると考えられる。それよりむしろ、温度膨 張によって架台にひずみが生じ、それが共振器長の 変動に反映している可能性が高い。架台の強化と壁 や床への固定が変動の抑制に効果的であると思われ るので、現在この作業を検討中である。

また、FEL 発振の頻度が増えるにつれて多層膜共振器ミラーの反射率が劣化していくという問題も発生している<sup>[8]</sup>。LEBRA では電子ビームの間引きを行っていないので、ミラーの耐久性に関して非常に厳しいと予想される。

#### 4. 光源実用化へ向けた課題

FEL を波長可変光源として運用するには、共振器 ミラーを金属コートミラーに交換する必要がある。 多層膜ミラーでの経験から、電子ビーム軌道の変動 の影響を受けにくいミラーのほうが安定な発振のた めには良いと考えられる。従って、ミラーの曲率半 径が現在使用しているものよりも少し長い Au 皮膜 ミラー2 (Table 2) を用いることを予定している。

金属ミラーにした場合、従来のように多層膜ミラ ーを透過する He-Ne レーザを用いてアライメントを 行うことが難しくなる。そこで、屈折によるビーム 位置のずれが起こらないキューブ型ビームスプリッ ターを共振器内に導入することにした。図3は FEL システムの光学系と予定されているアライメント用 レーザの光路を示した概念図である。FEL ビームは 楕円ミラーと放物ミラーで構成されるユニットで平 行化されて利用実験室まで輸送されるが<sup>[9]</sup>、He-Ne レ ーザビームは各実験室でのガイド光の役割もする。 末端の実験室までの光路は約 30m あるので、このビ ームスプリッターには高精度のものが要求される。

光源として FEL を安定に供給するためには、長時 間発振を維持しなければならない。そのためには共 振器長の温度変化による変動をできるだけ抑制する とともに、ピエゾ素子で微調整してやる必要がある。 室温などの変化をリファレンスとして利用し、共振 器長の補正を自動化することが可能であると思われ る。そのための課題として、最適と思われる測定点 の選定や、共振器長変動の温度変化に対する移動量 のキャリブレーション手法の確立などが挙げられる。

#### 参考文献

- [1] Y. Hayakawa, et al., Nuclear Inst. and Methods A 483 (2002) p. 29.
- [2] T. Sakai, et al., Proc. of the 26<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, (2001) p.222.
- [3] K. Yokoyama, et al., Proc. of the 26<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, (2001) p.231.
- [4] K. Hayakawa, et al., Proc. of the 25<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, (2000) p.56.
- [5] Y. Hayakawa, et al., Proc. of the International Symposium on IR FEL and its Application, to be published.
- [6] Y. Tanaka, et al., Proc. of the International Symposium on IR FEL and its Application, to be published.
- [7] K. Kanno, et al., Proc. of the 26<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, (2001) p.73.
- [8] T. Hasegawa, et al., Proc. of this Meeting. (8P-43)
- [9] E. Hashimoto, et al., Proc. of the 26<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, (2001) p.243.

# FEL 共振器ミラーの反射率の測定

長谷川 崇<sup>1,A)</sup>、宮崎 慎也<sup>A)</sup>、境 武志<sup>A)</sup>、中尾 圭佐<sup>A)</sup>、菅野 浩一<sup>A)</sup>、石渡 謙一郎<sup>A)</sup>、村上 琢哉<sup>A)</sup>、 橋本 英子<sup>A)</sup>、藤岡 一雅<sup>A)</sup>、佐藤 勇<sup>B)</sup>、早川 建<sup>B)</sup>、田中 俊成<sup>B)</sup>、早川 恭史<sup>B</sup>、横山 和枝<sup>B)</sup> <sup>A)</sup>日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻

> 〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎 <sup>B)</sup> 日本大学量子科学研究所

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎

#### 概要

日本大学電子線利用研究施設(LEBRA)の自由電 子レーザー(FEL)システムでは狭帯域の誘電体多層 膜ミラーを用い、波長 1.5µm での FEL 発振の安定化 を目指した加速器全般の調整とそれに基づく FEL 発 振実験を繰り返してきた。

最近になって、誘電体多層膜ミラーの劣化による と思われる反射率の低下の兆候が顕著に見られたた め、反射率の低下の程度およびその波長依存性を、 光共振器内に蓄積された FEL 光の減衰特性の測定か ら求めた。この結果から、中心波長での反射率は初 期の 99.5%から 98.5%へと低下していることが確か められた。また、FEL の立ち上がり波形を利用して 同時に行った FEL 利得の解析から、最大で 11%の利 得が得られていることが分かった。

# 1. はじめに

可視〜紫外領域での自由電子レーザー (FEL) では 発振利得が小さいことから、光共振器ミラーとして 高反射率の得られる誘電体多層膜ミラーが使われる が、その反射率低下は FEL 発振を容易に妨げ、大き な問題である。ミラーの反射率低下の主要な原因に ついては、アンジュレーター光に含まれる高次光で ある高エネルギー光子との相互作用によって引き起 こされる、ミラー表面へのカーボン堆積や多層膜中 でのカラーセンター蓄積などが知られており<sup>[1]</sup>、反射 率回復技術も研究されている<sup>[2]</sup>。

日本大学電子線利用研究施設(LEBRA)では 2001 年5月に、中心波長 1.55µm での反射率 99.5%以上の 誘電体多層膜ミラーを共振器に用いて FEL 発振に成 功し、これまで電子ビーム安定化およびリニアック の高性能化による赤外 FEL の発振安定化の実験を続 けてきた。表1にリニアックの仕様、表2に赤外ア ンジュレーターの仕様を示す。赤外アンジュレータ ーで目標としている FEL 発振波長範囲は 1~5µm で ある。したがって、誘電体ミラーでは狭帯域のため 近い将来金属ミラーに置き換える予定であるが、実 験の都合で使用を継続してきた。

このシステムを用いて LEBRA ではいままでに約 100 時間の赤外 FEL 発振実験が行われてきた。今年 になって誘電体多層膜ミラーの劣化によると思われ 表 1.125MeV リニアックの仕様

加速周波数	2856 MHz
クライストロン最大出力	30 MW
クライストロン本数	2
電子ビームエネルギー	30 <b>~</b> 125 MeV
電子ビームエネルギー幅	0.5~1%
マクロパルスビーム電流	200 mA
マクロパルス長	20 µs
加速繰り返し	12.5 Hz
ミクロパルス長	3.5 ps
ミクロパルスビーム電流	20 A
規格化ビームエミッタンス	20 πmm.mr

表 2. 赤外アンジュレーターの仕様

アンジュレーター周期長	48 mm
アンジュレーター周期数	50
最小磁極ギャップ	29 mm
軸上最大磁場	0.33 T
最大 <i>K</i> 值	1.5
光空洞共振器長	6718.04 mm
FEL 波長	5 <b>~</b> 0.8 μm

る反射率の低下の兆候が、実験中に FEL 光の減衰波 形の変化として見られるようになったため、反射率 の低下を調べることにした。

#### 2. 光ビームの検出

LEBRAでのFELの検出は図1のような観測システムを配置して行っている。図1においてアンジュレーターからの光のうち誘電体ミラーを透過した光は放射線遮へい壁で隔てられた隣の部屋に導かれる。 赤外 FEL はコールドミラーを突き抜けて赤外線ディテクターに到達し、一方可視光などの高調波はコールドミラーで反射され、望遠鏡に導かれてカラー CCD カメラで観測することができる。高調波を観測 することにより、電子ビームの形状および自発放射

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> E-mail: t-hasegawa@lebra.nihon-u.ac.jp



Radiation shield Accelerator room

#### 図1.アンジュレーター光観測システム。

光の分布を知ることができるので、ビーム調整においてモニター用に高調波の観測を行っている<sup>[3]</sup>。また、赤外線ディテクターとして InSb と HgCdZnTe の二種類のディテクターを使っている。FEL の強度が弱い場合には高感度の InSb ディテクターを主に使い、強い場合には低感度の HgCdZnTe ディテクターを主に使って FEL の検出を行っている。赤外ディテクターの受光面積はどちらも 1mm<sup>2</sup>で、受光面の位置をHe-Ne レーザーを用いてアンジュレーター中心軸に合わせてある。

図2に電子ビーム波形とFEL検出波形の例を示す。



図 2. Linac の電子ビーム波形およびアンジュレー ター出力光のディテクター検出波形。a):ファラ ディーカップによる電子ビーム波形(40mA/div)、 b): InSb による 1.5µm FEL 光の検出波形 (100mV/div)、c):b)の1V/divスケールでの波形。 水平軸スケール:4µs/div。

#### 3. 波形解析

電子ビームの先頭がアンジュレーターに入射して から共振器中に光が蓄積される様子を数式化して考 える。アンジュレーターで最初に放射された光がミ ラー間をn回(n=0,1,2,...)往復する間には、光が往 復する毎にこの光と同期して次々とアンジュレータ ーに入射した電子から自発光と FEL 光が放出され蓄 積・重畳される。その時観測システムにある赤外線 ディテクターで得られる出力電圧をV<sub>n</sub>とすると以 下のような単純化した関係式を仮定することが出来 る。ただし、FEL が飽和しない場合を考える。

$$V_{n} = AI_{u} \{ (1 - R)B + C_{T} \}$$
(1)

$$B = \left\{ C_L \sum_{k=0}^{n} (1+G)^k R^{2k} + C_A \sum_{k=0}^{n} R^{2k} \right\}$$
(2)

ここで $I_U$ は電子ビーム電流、Aはディテクターの感度と幾何学的要因による検出率を考慮した係数、Rは共振器内の各ミラーの反射率、Gはマクロパルス内で一定と仮定した FEL の利得である。光の往復回数nは共振器長から、ビームパルスの始まりから経過した時間 $t \ge t = 44.8n$  ns の関係がある。上式ではまた、アンジュレーターで放射される基本波を、共振器に反射率Rで蓄積されるうち FEL 発振に寄与する成分と寄与しない成分、さらに反射率0で完全にミラーを透過する成分、の3つの成分に分けられる  $\ge C_L$ 、共振器内に蓄積されるものの発振に寄与しない割合を $C_A$ 、共振器内に蓄積されずミラーを透過する割合を $C_T$ とおいた。したがって

$$C_L + C_A + C_T = 1 \tag{3}$$

である。

また、電子ビームマクロパルスが終わった後では、 ディテクター出力にはミラーでの透過損失による減 衰のみが反映するので、最初のビーム入射から数え てn往復後の出力は

$$V_n = V_{n_f} R^{2(n-n_f)}$$
(4)

と表される。ここで*n<sub>f</sub>とV<sub>n</sub>はそれぞれマクロパル*ス終了時の光往復回数とディテクター出力である。

以上のことから FEL の立ち上がりと減衰の波形を 測定すると、(1)、(2)、(4)式による波形解析からミラ ーの反射率を求め、さらに FEL の発振利得を推定す ることができる。

FEL が発振していない状態ではディテクターの出 力が小さくノイズが大きいため、測定ではある程度 強く発振している状態のディテクター出力波形を、 ディジタルオシロスコープで取り込むことにした。 上の議論を元に、FEL 発振が見られる範囲でアンジ ュレーター磁極ギャップを変えて取得した波形デー タの解析を行ない、ミラー反射率のギャップ依存性、 つまり FEL 波長依存性を求めた。

#### 4. 結果とまとめ

今回の測定はすべて 86.8MeV に加速した、マクロ パルス電流約 60mA の電子ビームを用いて行った。 図 3 に測定されたディテクター出力波形を片対数表





図 3. FEL 光受光強度波形の片対数表示グラフ。 実線はミラー反射率 98.6%、FEL 利得 11.5%と した時のシミュレーションの結果を示す。

示した例を示す。ここで、ディテクター出力が約 1V で飽和しているのは、オシロスコープのフルスケー ルの設定による。

(1)~(4)式のパラメータを調整することにより検出 波形の立ち上がりと減衰の波形をシミュレーション した結果を図 3 の実線で示してある。検出に用いた 高感度の InSb ディテクターは増幅器が約 5V で飽和 する。共振器に蓄積された光強度に対応するディテ クター検出信号電圧は数 mV であるため、この 10° 倍程度以上と予想される FEL 発振時の飽和波形はこ のままでは見ることが出来ない。

パラメータの調整は、目でグラフの一致を見て行 った。図3の例では電子ビーム終了後の光強度の減 衰からミラー反射率を 98.6%と推算し、さらに FEL の立ち上がりから FEL 利得は 11.5%と推算された。 シミュレーションで FEL の立ち上がりのタイミング が実測波形と異なるのは、FEL が飽和せず電子ビー ムの終了時から強度が減衰すると仮定して減衰曲線 が一致するよう全てのパラメータを調整しているた めである。電子ビーム終了時での自発放射光に対す る FEL の強度比は 10<sup>7</sup>程度と見積もられるので、実 際には FEL が飽和している可能性がある。

このような解析作業を、それぞれのアンジュレー ターギャップにおいて測定したディテクター出力波 形について行った。得られた結果と、メーカー(シ グマ光機)による製作時の反射率測定データとの比 較を図 4 に示す。ただし、現在 LEBRA の不安定な 発振の状況では FEL スペクトルを測定するのが難し いため、FEL の波長はアンジュレーターギャップと 電子ビームエネルギーから概算したので、波長の絶 対値は一致が良くない。

測定は2日間に渡っているが、菱形の記号で示さ れている1日目の結果では反射率の平坦な領域で段 差が生じているのが分かる。この時、測定の時系列 では最初は段差のある位置を起点に左側の方向に、 次に境目から右の方向に測定を行っていた。また、 2日目の結果は1日目の結果に見られた段差付近を 測定したものである。

図 4 の比較から分かるように、メーカー測定によ る中心反射率 99.6%に対して1日目の結果では 98.9%、2日目では98.5%まで反射率が低下している。 また、1日目の結果において見られた反射率の段差 および1日目と2日目の結果の違いは、1日目の測 定途中で反射率が変化したことによると解釈するこ とが出来る。

結果として、ミラー1枚当たりの反射率は製作時 より1%劣化していることになるが、これがアンジュ レーターの上下にあるミラー両方に生じているのか、 あるいは下流のミラーが特に劣化が著しいのか判断 することは出来ない。これについては、波長可変に するために金属ミラーに変更した際に、改めて取り 外したミラーの反射率を確認する必要がある。



図 4. 反射率測定結果の比較。実線はメーカー測 定による反射率の波長依存性で、中心で反射率 99.6%。菱形および四角記号の点は今回の測定結 果で、最終的に約1%反射率が劣化している。測 定点の波長の絶対値は確かめていない。

参考文献

- [1] U. Bizzarri et al., Rivista Nuovo Cimento <u>10</u> (1983) 1. [2] K. Yamada et al. Nucl. Instr. M. d. 1965 <u>10</u> (1983) 1.
- [2] K. Yamada et al., Nucl. Instr. Meth. <u>A358</u>(1995) 392. [3] 田中俊成 その他, Proc. 26th Linear Accelerator Meeting in Japan (2001) 246.

ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com





Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 507 (2003) 404-408

www.elsevier.com/locate/nima

# Characteristics of the fundamental FEL and the higher harmonic generation at LEBRA

Y. Hayakawa<sup>a,\*</sup>, I. Sato<sup>a</sup>, K. Hayakawa<sup>a</sup>, T. Tanaka<sup>a</sup>, K. Yokoyama<sup>a</sup>, K. Kanno<sup>b</sup>, T. Sakai<sup>b</sup>, K. Ishiwata<sup>b</sup>, K. Nakao<sup>b</sup>, E. Hashimoto<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Laboratory for Electron Beam Research and Application, Atomic Energy Research Institute, Nihon University, Narashinodai 7-24-1, Funabashi-shi, Chiba-ken 274-8501, Japan

<sup>b</sup> College of Science and Technology, Nihon University, Narashinodai 7-24-1, Funabashi-shi, Chiba-ken 274-8501, Japan

#### Abstract

The FEL system of Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) at Nihon University has provided relatively high FEL gain around 10% at the wavelength of 1.5  $\mu$ m. The numerical estimation of the FEL gain suggests that LEBRA-FEL system has a sufficient performance on the electron beam bunching.

In addition, the amplification of the third harmonics accompanying the intense fundamental FEL has been observed and the spectra of which have been measured. The experimental result indicates that the phenomenon is a kind of nonlinear harmonic generation.

© 2003 Elsevier Science B.V. All rights reserved.

PACS: 41.60.Cr; 41.75.Ht; 29.17.+w

Keywords: FEL; Electron linac; FEL gain; TDA3D; Nonlinear harmonics

#### 1. Introduction

At Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) of Nihon University, the free electron laser (FEL) project was started in 1994 and the first lasing in the near infrared region (IR) was achieved in 2001 [1,2]. The accelerator used in LEBRA is a conventional S-band electron linac without an RF gun, a sub-harmonic buncher or a super-conductive accelerating structure. Therefore, this success has demonstrated a practical performance of a low-cost FEL system with a conventional linac.

In LEBRA-FEL system, a couple of dielectric multi-layer mirrors have been used in the resonator. At the stage aiming for the first lasing, the use of the dielectric mirrors was reasonable because of its high reflectance and ease on the alignment of the experimental setup using the guide beam such as a He–Ne laser. Since the theoretical estimation suggested that the FEL gain for LEBRA system may have a narrow margin for the lasing, the loss in optical cavity should be suppressed. There was the possibility of an insufficient micropulse peak current due to beam bunching with no special

<sup>\*</sup>Corresponding author. Tel.: +81-47-469-5983; fax: +81-47-469-5490.

*E-mail address:* yahayak@lebra.nihon-u.ac.jp (Y. Hayakawa).

<sup>0168-9002/03/\$ -</sup> see front matter  $\odot$  2003 Elsevier Science B.V. All rights reserved. doi:10.1016/S0168-9002(03)00954-9

device in the injector section. Thus, the resonator has been equipped with the multi-layer mirrors with a reflectance of 99.5% around a wavelength of 1.5  $\mu$ m.

Although the FEL lasing was achieved in LEBRA system, the FEL gain has not shown linear dependence on the beam intensity of the macropulse. Unexpectedly, there has been a tendency for a lower beam current to lead to a larger FEL gain. The result suggests that LEBRA-FEL system has a sufficient capability for the beam bunching but the RF power fed into the injector is not enough. Accompanying the intense FEL lasing, the amplification of the third harmonics that seems to be the nonlinear harmonic generation has been observed. This phenomenon also provides an evidence of the high FEL gain obtained with LEBRA-FEL system.

On the one hand LEBRA-FEL system has substantial performance with regard to the FEL gain, but on the other hand it has serious instability that may be a bad aspect on the short bunch length. No saturation of the FEL gain has been observed in the FEL system yet.

This paper discusses the gain of the fundamental FEL and reports the experimental results of the third harmonic amplification.

#### 2. Specification of LEBRA-FEL

The specifications of LEBRA-FEL based on the 125 MeV S-band linac system are shown in

Table 1 Specification of LEBRA-FEL		
Electron beam energy	50–125 MeV	
Acceleration frequency	2856 MHz	
Beam pulse duration	20 µs	
Maximum beam intensity	200 mA	
Repetition rate	12.5 Hz	
Normalized emittance	$\sim 20\pi$ mm mrad	
Energy spread	<1%	
Undulator period length	48 mm	
Number of periods	50	
K-value (rms)	0.57-1.2	
Cavity length	6718 mm	
Rayleigh length	1.467 m	
FEL wavelength	0.8–5 µm	

Table 1. Although the linac is conventional one, it has a traveling-wave-type prebuncher tube with seven cells and a  $90^{\circ}$  achromatic bending system as a momentum analyzer [3]. These devices bring a high-quality electron beam with short bunch length and narrow energy spread.

The undulator was designed for near-IR and the resonator has been set up for the lasing at a wavelength of  $1.5 \,\mu\text{m}$  using the dielectric mirrors.

In the present routine operations, the energy and the current of the electron beam are limited up to 90 MeV and 100 mA, respectively, due to the shortage of the RF power and the limitation of the radiation protection shield.

#### 3. FEL gain of LEBRA system

The measurements of the fundamental FEL and the third harmonics have been carried out simultaneously with the separate detectors by the separation of the near-IR and the visible lights using a cold mirror [4]. The macropulse shape of the fundamental FEL is shown in Fig. 1 together with that of the beam current. It was obtained with an InSb detector when the kinetic energy and the energy spread of the electron beam were 86.7 MeV and within 1%, respectively. In order to estimate R, the optical power loss per one round trip in the cavity, the time dependent function

$$V_{\rm d}(t) = A_{\rm d} + B_{\rm d}(1-R)^{t/T}$$
(1)



Fig. 1. The pulse shapes of the electron beam current and the fundamental FEL. Fitting curves for the latter give the power loss in the cavity and the FEL gain.

was fitted to the decay of the FEL pulse, where  $A_d$ and  $B_d$  are the fitting parameters and T(= 44.8 ns)is the period of one round trip. From the fitting, Rwas estimated to be 0.0248. Similarly, the fitting to the rising slope was performed using the function

$$V_{\rm r}(t) = A_{\rm r} + B_{\rm r}[(1+G)(1-R)]^{t/T}$$
(2)

where  $A_r$  and  $B_r$  are also the fitting parameters and G is the FEL gain. Here, G was assumed to be constant in the macropulse duration and R has the same value as that of Eq. (1). As a result of the fitting, G was estimated to be 0.097. The FEL macropulse power of the event was simultaneously measured using a pyroelectric detector, which was estimated at 1 mJ.

To investigate the condition of the electron beam which leads to the FEL gain around 10%, numerical calculations were carried out using the one-dimensional model based on the small-signal gain theory and the three-dimensional simulation code TDA3D [5]. Fig. 2 shows the FEL gain function calculated using the parameter of LE-BRA-FEL, where the peak current  $I_p$  was determined so that the maximum FEL gain should be 10%. As the focusing parameters used in TDA3D, the values leading to as high FEL gain as possible were picked out. It suggests that at least the peak current of 12 A should be required of the electron bunch even in an ideal condition. This value corresponds to the bunch length shorter than 1.8 ps for the macropulse beam intensity of 60 mA. The result of the measurement for the



Fig. 2. FEL gain function calculated using 1-D model and TDA3D.

electron beam spectrum, which showed the energy spread narrower than 0.5%, supports that the electron bunch length is shorter than 10 ps [6]. Taking account of the beam emittance and the energy spread, it is possible that the peak current exceeds 20 A and the bunch length is shorter than 1 ps. Actually, the considerable short bunch length is consistent with the fact that the FEL gain has been quite sensitive to the instability of the system such as the fluctuation of the commercial electric power. Assuming that the bunch length is of the order of 1 ps, the peak power extracted from either cavity mirror is estimated to be at least 20 kW. Taking the transmittance of the dielectric mirror into account, the intra-cavity peak power may exceed the power-proof of the mirror,  $1 \text{ MW/mm}^2$ . The spot damage that is probably due to the optical power has actually been found on the mirror surface.

#### 4. Second and third harmonic generation

The enhancement of the higher harmonic radiation has been observed in LEBRA-FEL [1,4]. Fig. 3 shows that the third harmonics is growing approximately three times faster than the fundamental FEL in the same event. Here, the exponential fitting was performed in order to compare the power growth. The quick decay of the



Fig. 3. Comparison between the amplification of the fundamental FEL and the third harmonics. Exponential curves were fitted to the pulse rises.

third harmonic signal also indicates that the harmonic amplification is not due to the accumulation in the resonator but the single-pass process. These characteristics suggest that the phenomenon is attributed to the nonlinear harmonic generation [7,8].

The instability of the FEL lasing has disturbed the measurement of IR spectra by the scanning method. Using a spectrometer with a backilluminated CCD camera for spectroscopy, however, has provided single-shot spectra in the visible range for one macropulse duration [4]. Fig. 4 shows the typical spectra of the second and the third harmonic generations taken with the spectrometer. The spectral peaks indicate that the fundamental lasing wavelength is 1460 nm. The width of the third harmonic spontaneous emission (SE) was spread probably due to the superposition of two peaks which resulted from the excessive bunching of the electron beam. Thus, no obvious peak shift in the spectrum of the third harmonics after the amplification has appeared.

The amplified harmonics are expected to have superior coherence to the normal SE. As shown in Fig. 5, however, the band-width in terms of full-



Fig. 4. Typical second and third harmonics spectra of the normal spontaneous emission (dotted lines) and the amplified one (solid lines).



Fig. 5. Spectral width vs. radiation yield integrated around each peak of the second and the third harmonics.

width at half-maximum (FWHM) of the harmonic generations seems to be almost independent of the radiation power. The behavior is presumably due to condensing by use of a telescope immediately before the spectrometer. The obtained spectra have roughly the same widths as that of a spectrum integrated over the emission angle of 0.5 mrad. Further accurate investigation into the coherency of the radiation will require severe collimation for the optical beam.

#### 5. Conclusion

The large FEL gain around 10% obtained with LEBRA-FEL, which has brought the nonlinear harmonic generation, suggests that the system has a rich performance on the beam bunching. Further improvement of the linac stability will make possible a low-cost, high-gain FEL system.

#### Acknowledgements

This study has been financially supported by the grant from Ministry of Education, Science, Sports and Culture to promote multi-disciplinary research projects since 2000.

#### References

- Y. Hayakawa, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 483 (2002) 29.
- [2] T. Tanaka, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 41, Suppl. 41-1 (2002) 34–40.
- [3] K. Hayakawa, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 375 (1996) ABS 25.
- [4] Y. Hayakawa, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 41, Suppl. 41-1 (2002) 54–57.
- [5] T.M. Tran, J.S. Wurtele, Comput. Phys. Commun. 54 (1989) 263.
- [6] K. Yokoyama, et al., Nucl. Instr. and Meth. A (2003), these Proceedings.
- [7] Z. Huang, K. Kim, Phys. Rev. E 62 (2000) 7295.
- [8] G. Dattoli, P.L. Ottaviani, Opt. Commun. 204 (2002) 283.

ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com



Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 507 (2003) 357-361



www.elsevier.com/locate/nima

# Stability of the LEBRA infrared FEL

K. Yokoyama<sup>a,\*</sup>, I. Sato<sup>a</sup>, K. Hayakawa<sup>a</sup>, T. Tanaka<sup>a</sup>, Y. Hayakawa<sup>a</sup>, K. Kanno<sup>b</sup>, T. Sakai<sup>b</sup>, K. Ishiwata<sup>b</sup>, E. Hashimoto<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Laboratory for Electron Beam Research and Application, Nihon University, 7-24-1 Narashinodai, Funabashi 274-8501, Japan <sup>b</sup> Graduate School of Science and Technology, Nihon University, 7-24-1 Narashinodai, Funabashi 274-8501, Japan

#### Abstract

The free electron laser (FEL) gain and the power have still been unstable, although the lasing of 1.5  $\mu$ m FEL was achieved at the Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA). It has been observed that the FEL gain changes during the pulse duration. In order to investigate the cause of the fluctuation of the FEL gain, the beam energy spectra in the pulse duration and the IR light signals were measured with different input RF power and RF phase of the injector. It is found that the fluctuation of the beam energy during the pulse duration occurs in spite of the RF phase flatness (<0.5°/20  $\mu$ s).

© 2003 Elsevier Science B.V. All rights reserved.

PACS: 41.60.Cr; 29.27.Fh; 29.17.+w; 29.27.Bd

Keywords: FEL; Electron linac; Near-IR; RF

#### 1. Introduction

The Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) electron linac has been developed to produce a high-power visible-toinfrared (IR), from  $0.8 \,\mu\text{m}$  to  $5 \,\mu\text{mm}$ , free electron laser (FEL) for the advanced studies on the various fields such as material science, biology and medical science [1]. The short-wavelength FEL requires a high quality electron beam with a long pulse duration, low energy spread and high current density. In particular the gain of a FEL is sensitive to the energy spread of the electron beam. On the LEBRA linac, the specifications for the beam pulse duration and the normalized emittance are 20  $\mu$ s and 20  $\pi$ mm  $\times$  mrad, respectively. The beam extracted from the linac is transported to the FEL system through a momentum analyzer which consists of a slit, a collimator, four quadrupole magnets and two  $45^{\circ}$  bending magnets. The energy spread of the beam for the FEL is restricted to 1% by the momentum analyzer. The energy drift is reduced by using the phase drift compensation system, which suppresses the fluctuation of the RF phase in the pulse duration and the long operation time simultaneously [2]. As a result of the improvement, the energy drift was reduced from 3.3% to 0.5% and the beam pulse duration in the FEL line was extended from 10 to 18 µs. Although the lasing of 1.5 µm FEL was achieved at LEBRA [1], the FEL gain and the power have still been unstable. The FEL oscillation with two gains was

<sup>\*</sup>Corresponding author.

E-mail address: k\_yokoyama@lebra.nihon-u.ac.jp

<sup>(</sup>K. Yokoyama).

<sup>0168-9002/03/\$ -</sup> see front matter  $\odot$  2003 Elsevier Science B.V. All rights reserved. doi:10.1016/S0168-9002(03)00920-3

mainly observed during the pulse duration in later section. The FEL pulse shape and the energy spectra of the electron beam were measured in order to investigate the cause of the fluctuation of the FEL gain.

#### 2. Experimental background

#### 2.1. RF system

The LEBRA linac consists of three main parts, the injector system, the accelerating structures and the beam transport system to the undulator. The accelerating RF power is supplied from two klystrons, which are operated at 2856 MHz with a pulse width of 20  $\mu$ s, a pulse repetition rate of 2 Hz and a peak output power of approximately 20 MW. Each klystron is driven by a pulsed RF amplifier.

A phase drift in the RF amplifer occurs during the pulse duration due to thermal characteristics of transistors. The phase drift compensation RF system was performed by means of a fast phase shifter inserted before the input of the RF amplifier [2]. The output phase of the fast phase shifter was controlled by using the voltage signal fed from the function generator. As a result of introducing the phase drift compensation system, the phase shift in the RF pulse duration of 20 µs was suppressed less than  $0.5^{\circ}$  for each klystron as shown in later discussion. In addition to the phase compensation in the pulse duration, the slow drift of the klystron output phase due to a change in room temperature was cancelled using the slow feedback circuit. The phase drift has been within  $0.5^{\circ}$  for each klystron.

#### 2.2. RF phase stability

The energy gain of the linac is proportional to the integration of the accelerating field that the electrons experience along the accelerator. The field is expressed as  $E\cos\theta$ , where E is the amplitude of the axial electric field and  $\theta$  is the accelerating phase of the bunched electrons. The fluctuation of the phase leads to beam energy fluctuation. As for FEL gain, a maximum average energy variation of the electron beam is given by

$$\frac{\Delta E}{E} \leqslant \frac{1}{2N}$$

where N is the number of periods of the Undulator Magnet, E is the energy of relativistic electrons moving in the magnetic field and  $\Delta E$  is the energy spread (HWHM) [3]. Thus, the energy spread must be less than 1.0% for N = 50 in LEBRA FEL system. On the other hand, the light pulse accumulated in the optical cavity has to overlap the micropulse of the electrons spatially in the undulator. Therefore, the stability of the RF phase is also important.

The phase difference between the reference RF and the klystron output was detected for each klystron using the double-balanced mixer (DBM), as shown in Fig. 1. The reference is a cw RF from a master oscillator. The figure shows accumulated waveforms of the phase drift in 10 s (20 pulses). The result shows that the phase variation is less than  $0.5^{\circ}$ . Assuming that the beam bunch length is 5 ps and that the overlapping region of each light pulse is 90%, a RF phase fluctuation of less than  $0.5^{\circ}$  is required for the stable FEL oscillation.



Fig. 1. Stability of the klystron output phase, which accumulated 20 waveforms in 10 s. The detected signal scale is  $1.2^{\circ}$ /div. (a) RF phase of the #1 klystron for the injector section and the first accelerating tube, (b) RF phase of the #2 klystron for two accelerating tubes.



Fig. 2. FEL oscillation with two gains: (a) FEL pulse shape; and (b) electron beam current (40 mA/div). (a)' Is displayed in different vertical scale of (a). The IR detector is saturated.

#### 2.3. Problems

The stability of the phase seems to be sufficient to produce the beam with required qualities. In the actual operation of the linac, the beam transported to the FEL system is also stable. Variation of the FEL gain, however, has been observed as shown in Fig. 2. To investigate the correlation between the FEL gain variation and the beam energy, time dependent energy spectra and the IR light signals were measured simultaneously. The energy spectra averaged every 1 µs except for the transient time region are shown in Fig. 3. The energy spectra were obtained by utilizing the first  $45^{\circ}$  bending magnet of the momentum analyser as a spectrometer. The energy spectra were split in two peaks as shown in (a) and the energy fluctuation was found during the pulse duration as shown in (b). Variation of the FEL gain might be caused by the beam energy spectra with two peaks in Fig. 3. The FEL pulse shapes were measured after adjusting RF power and phase so that the beam would have the spectrum with a single peak.

#### 3. Experimental results and discussion

#### 3.1. Results

Two typical waveforms of the electron beam and the FEL power are shown in Fig. 4. The difference



Fig. 3. Energy spectra: (a) energy spectra shape in the pulse duration. Energy spread is 0.7% FWHM; and (b) the distribution of the beam current intensity of the energy spectra.

between (A) and (B) is attributed the shape of the beam current that passes through the undulator. The difference of the beam current was obtained by adjusting the accelerating phase of the third accelerating tube. This is equivalent to the shift in the peak of the beam energy spectra. The pulse shape in Fig. 4(A) may indicate that the beam quality has changed at middle of the pulse. It is likely that the first amplification of the FEL was interrupted in middle of the pulse and that another FEL oscillation was lased. The pulse shape in Fig. 4(B) suggests that only latter oscillation appears and that the FEL gain is greater than that in Fig. 4(A). From the result of the measurement, variation of the FEL gain may be caused by the fluctuation of the beam quality during the pulse duration.

The energy spectra are shown in Fig. 5. The peak of the energy spectra changed during the pulse duration similar to that in Fig. 3 in spite of adjusting the linac condition. Both waveforms of FEL show that variation of the FEL gain during the pulse duration is dependent on the energy fluctuation rather than the shape of the energy



Fig. 4. FEL oscillation with two gains: (A) and (B) differ in the accelerating phase of the beam bunch. (a) FEL pulse shape; and (b) electron beam current (20 mA/div). (a)' Is displayed in different vertical scale of (a).



Fig. 5. Energy spectra: (a) energy spectra shape in the pulse duration. Energy spread is 0.2% FWHM; and (b) the distribution of the beam current intensity of the energy spectra.

spectra. Furthermore, the FEL gain differs in these two waveforms.

#### 3.2. Discussion

FEL gain by the beam that has the spectrum with split peaks was larger than the gain by a beam with the improved spectrum. According to a simulation of FEL oscillation, peak current of the micropulse beam must be greater than 10 A in order to achieve the required gain (about 8%) [4]. It means that the bunch length must be only about 1 ps. Considering the spectrum with split peaks in Fig. 3, the power of the RF supplied into the buncher was too large and electrons might have been bunched excessively [5]. Over-bunched electrons may form two adjoining bunches with narrow phase width compared with a bunch formed normally. The low energy electrons are removed by the slit, then the high peak current beam with a comparatively narrow energy spread is transported to the undulator. The energy spectra of the beam in Fig. 5 were remarkably improved compared to that in Fig. 3. However, the FEL gain was small. It seems that small FEL gain means low peak current, i.e., the bunch length was long in Fig. 5.

In spite of good phase flatness described previously and shown in Fig. 1, the beam energy and the FEL gain were changed during the pulse duration in this experiment. Such energy fluctuation was not reduced, even when the RF phase was modulated with a function generator. Furthermore, with adjusting the PFN to minimize the phase oscillation, the energy fluctuation was not reduced. In addition, change in klystron amplitude was not enough to have a significant effect.

#### 4. Conclusion

If the electron bunch length is around 1 ps, the phase stability of  $0.5^{\circ}$  is not sufficient for stable

lasing. Therefore, the FEL oscillation might be interrupted by the energy change during the pulse duration. However, it is difficult to achieve the phase stability of  $0.1^{\circ}/20 \,\mu$ s. From the result of the measurement, bunch length of the electron beam should be expanded in order to stabilize the FEL oscillation. The FEL gain is proportional to peak current. In order to obtain the same gain as a bunch with a length of 1 ps, peak current should also be the same. To satisfy both requirements, the number of electrons in a bunch should be increased. It is also important to investigate the cause of the changing beam energy and to make the electron beam energy uniform during the pulse duration.

#### Acknowledgements

This work is partly supported by High Energy Research Organization (KEK).

#### References

- [1] Y. Hayakawa, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 483 (2002) 29.
- [2] K. Yokoyama, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 41 (2002) 4758.
- [3] G. Dattoli, A. Renieri, Experimental and theoretical aspects of the free-electron-laser, Elsevier, Amsterdam, 1985, p. 27.
- [4] Y. Hayakawa, et al., Proceedings of the 24th International Free Electron Laser Conference, Argonne, USA 2002, Nucl. Instr. and Meth. A 507 (2003) 404.
- [5] P.M. Lapostolle, A.L. Septier, Linear Accelerators, North-Holland, Amsterdam, 1970, p. 251.

# Proceedings of the 28 <sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan

July 30  $^{\rm th}$  - August 1  $^{\rm st}$  , 2003

Techno community square RICOTTI Tokai, Japan



JAERI 日本原子力研究所 Japan Atomic Energy Research Institute



京大学大学院工学系研究科 附属原子力工学研究施設

Tokai Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute And

Nuclear Engineering Research Laboratory, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

# 日本大学電子線利用研究施設におけるFEL共振器長の微小変化の測定

中尾圭佐<sup>1,A)</sup>、佐藤勇<sup>B)</sup>、早川建<sup>B)</sup>、田中俊成<sup>B)</sup>、早川恭史<sup>B)</sup>、横山和枝<sup>B)</sup> 境武志<sup>A)</sup>、菅野浩一<sup>A)</sup>、石渡謙一郎<sup>A)</sup>、長谷川崇<sup>A)</sup>、宮崎慎也<sup>A)</sup>

A) 日本大学大学院 理工学研究科量子理工学専攻
 〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎 物理実験B棟
 B) 日本大学量子科学研究所 電子線利用研究施設
 〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎 物理実験B棟

#### 概要

日本大学電子線利用研究施設(LEBRA) FEL光共振 器長の微小変化を測定するために、上流からHeNe レーザを入射し、下流ミラーの反射光と上流ミラー の裏面反射光の干渉模様を観察したところ、数Hzで 振動していることがわかった。ここではこの振動の 原因とその対策について報告する。

# 1. はじめに

LEBRAでは2001年5月に自由電子レーザ(FEL)発振 に成功し、FEL共同利用実験に向けて安定化に取り 組んでいる<sup>[1][2]</sup>。LEBRAでは、FEL発振の際、パルス 間の強度にばらつきが大きく共同利用実験に使用で きる安定度ではない。この原因としてFEL発振に必 要な電子ビームが十分安定ではないと思われていた ため、電子ビーム安定化に注力している<sup>[2][3]</sup>。

しかしFEL強度安定化には電子ビームが安定なだ けでなく、光共振器長も固定でなくてはならない。

そこで光共振器長のゆらぎを計測し、その除去を 試みた。

#### 2. 光共振器長の変動

レーザを共振器に入射し、共振器両端のミラーに よる反射光の干渉パターンの変化を測定し光共振器 長の変化を求めた。

LEBRA FEL光共振器の構成を図1に示す。

FELシステムは、周期磁場を作るアンジュレータ と共振器を構成する2枚のミラーから成り、ミラー はそれぞれ独立した架台に設置されている。

この共振器の上流(図1上部)からHeNeレーザ(波長 λ = 633nm)を入射し、両端のミラーで反射した光の 干渉模様をビデオ録画し、共振器長の変化を観察し た。その結果、絶えずλ/4からλ程度の振幅で光共振 器長が数Hzで振動していることがわかった。同時に 数時間周期のゆっくりとした光共振器長の変化の存 在も確認した。



図1 LEBRA FELシステムの構成 MS1,2は光共振器のミラーが載っている架台 で、S1は四極電磁石架台、S2は400kgコンク リートブロックである。S3はFELシステムが設 置されている加速器本体室の壁に固定されてい る。

#### 3. ミラー架台の振動

速い光共振器長の振動の原因を調べるため超高精 度レーザ変位計を用いて共振器付近の振動を測定し た。

光共振器ミラーは、電子ビームが放出する自発放 射光を反射するために、真空中にあり、ミラーの振

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> E-mail: nakao@lebra.nihon-u.ac.jp





動を直接測定することができない。

そのためミラーがのっているスタンドの振動を、 ミラーチェンバーがのっている架台表面を基準とし て測定したところ、レーザ変位計の測定限界である 20nm以下であった。 よってミラーと架台は同じ振 動をしていると考えられる。よってMS1の振動波形 はMS1とS1の相対距離を、MS2の振動波形はMS2とS3 の相対距離を測定する事で得た。(図1)

加速器運転中、加速管、偏向電磁石、集束用電磁 石、ビームダンプ等が発熱するためにこれらを冷却 する冷却系が装備されている。この冷却系は高圧で 水を流し、摂氏30度に維持するものである。この冷 却系を動作させるとミラー架台の振動が著しい。そ の時のMS1とMS2の振動波形を図2に示す。図2で MS1の振動(上段)の振幅が、MS2の振動振幅(下段)よ り大きいのは、基準となるS1が固定されていないた め、S1の振動も含んでいるためであると考えられる。

冷却系配管、偏向電磁石、床を各々打撃し、ミ ラー架台の振動の調べた。床を打撃した時のMS2の 振動を図3に、MS2付近の冷却水配管を打撃したと きの振動を図4に示す。これから床の振動よりも偏 向電磁石及び冷却水配管による影響が大きいことが わかった。

このことから、高圧の冷却水が冷却水配管を流れ ると、配管を振動させそれが偏向電磁石等に伝達す る。その振動が真空ダクトを通じてミラー架台を振 動させると考えられる。この冷却系は、電子ビーム を光共振器に導くための偏向電磁石を冷却しており、 撤去又は移動はできない。

#### 4. 振動への対策

一方でミラー架台の足は、幅45mm、厚さ5mmのL字 型 ア ン グ ル で で き て お り 、 そ の 上 に 697mm×500mm×25mmの鉄板が載せられている。華奢な 台にもかかわらず上からの荷重が大きいため、指一 本で押しても数µm動く。そこで架台の剛性を高める



図4 冷却水配管を打撃した時のMS2の振動 100nm/div, 1sec/div

ために、幅45mm、厚さ5mmのL字型アングルと、厚さ6mmの鉄板で、架台の側面を補強した。

ハンマでミラー架台MS2を打撃し、固有振動を測 定した。補強前後のMS2の固有振動及びそのスペク トルをそれぞれ図5、図6に示す。

また補強前後のMS2の応力-ひずみの関係を図7に 示す。これはばねはかりで、MS2に応力を加え、そ の時のS3との相対距離を測定した。ここからヤング 率は補強前3.36×10<sup>-2</sup>[µm/N]であったのが、補強後 5.52×10<sup>-1</sup>[µm/N]になった。

補強前後のミラー架台の振動を、図8に示す。 補強後の振動の振幅は、MS1、MS2共にレーザ変位 計の測定限界程度である20nm程度であった。

以上のことからこの補強で、ミラー架台の振動振幅を20nm程度まで抑えることが確認された。



# 5. まとめ

- 光共振器にHeNeレーザを入射し光共振器両端の 球面ミラーによる干渉縞を観察したところ、共 振器長のゆっくりとした変化と比較的速い振動 の存在が確認された。
- 偏向電磁石の冷却系を作動させると速い振動が 著しく大きくなる。これは冷却水が偏向電磁石 を振動させそれが真空ダクトを伝わってミラー チェンバーを揺らすからであると考えられる。
- 華奢なミラー架台の剛性を増すことで、この速い振動を抑えることができた。

# 6. 今後の課題

ゆっくりとした変動については本体室の室温また は架台等の温度などとの相関があると想像できるが、



図7 MS2の応力-ひずみ関係





まだ明確な結果が得られていない。

今後データを蓄積し相関を求め、光共振器長の補 償に取り組みたい。

# 参考文献

- [1] Y.Hayakawa, et al., "First Lasing of LEBRA FEL in Nihon University at a wavelength of 1.5µm", Nucl. Instr. and Meth. A (2002), Volume483/1-2,pp.29-33 (NIMA18811)
- [2] I. Sato, et al., "The present status of the electron linear accelerator on the Nihon University and the next research plan" Proc. of the 27<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, (2002) p.15-20
- [3] 横山和枝「FEL LINACにおけるRF系の改良によ るビーム安定化に関する研究」平成14年度日本 大学大学院理工学研究科博士論文



Available online at www.sciencedirect.com





Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 528 (2004) 486-490

www.elsevier.com/locate/nima

# Observation of SASE in LEBRA FEL system

T. Tanaka\*, K. Hayakawa, I. Sato, Y. Hayakawa, K. Yokoyama

Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA), Nihon University, 7-24-1 Narashinodai, Funabashi 274-8501, Japan

#### Abstract

A large enhancement of spontaneous undulator radiation has been observed during FEL lasing experiments at LEBRA. The enhancement has been observed only with the detector for the infrared fundamental radiation. The detector output signal showed spikes during the electron beam pulse, yet no apparent enhancement was observed with a CCD camera monitoring the visible harmonic radiations. An enhancement factor greater than 10 has been obtained with a 2.4 m long undulator with a completely detuned FEL optical cavity length and depends strongly on the parameters of the linac RF system. This implies that the SASE operation is possible even with a conventional electron beam by achieving suitable bunch compression.

© 2004 Published by Elsevier B.V.

PACS: 41.60.Cr; 41.85.Ja

Keywords: Infrared; FEL; SASE; Bunch compression

#### 1. Introduction

A self-amplified spontaneous emission (SASE) device has been considered as the next generation high-power radiation source, especially in the vacuum ultraviolet (VUV) to X-ray ranges where high-reflectance optical mirrors are unavailable. Typical X-ray SASE projects proposed so far [1] assume a combination of a high-energy electron linac and an extremely long undulator magnet. Meanwhile, recent experimental results on SASE in the near infrared (IR) to visible spectral ranges have shown that the SASE devices in these spectral ranges can reach optical power saturation within several meters along the undulator path by implementing a high charge density electron beam of medium energy [2,3].

The linac-based FEL system of the Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) in Nihon University [4] was designed to generate FEL in the near IR to UV spectral ranges by using an optical cavity having highreflectance mirrors. The present undulator consists of 50 periods of a Halbach-type permanent magnet array having a period of 4.8 cm, which was designed for lasing in the near IR range with the maximum RMS K-value of 1.2 [5]. Although the LEBRA FEL system was not designed to be used for SASE experiments, a large enhancement of the fundamental spontaneous radiation was observed at a detuned optical cavity length by adjusting the

<sup>\*</sup>Corresponding author.

E-mail address: tanaka@lebra.nihon-u.ac.jp (T. Tanaka).

<sup>0168-9002/\$ -</sup> see front matter 2004 Published by Elsevier B.V. doi:10.1016/j.nima.2004.04.137

linac operating condition. This suggests that the SASE mode operation is possible even with a relatively low-current electron beam from a conventional linac.

This paper reports the behavior of the optical power enhancement observed at the LEBRA FEL system in terms of the linac operating condition and the bunch compression effect in the achromatic bending system.

#### 2. LEBRA FEL system

The schematic layout of the LEBRA FEL system, upgraded since its first lasing, is shown in Fig. 1.

Since the electron beam is ejected continuously from the 100-kV thermionic gun over a linac RF pulse duration, the electron bunch is accelerated during every period of the 2856 MHz RF. The electron beam accelerated in the linac is transported to the FEL undulator through the 90° achromatic bending and analyzing magnet system (BM1 to BM2). The energy spread of the electron beam is defined with a horizontal slit placed in the dispersive section, where the energy spread is restricted to 0.3-2% of the central energy depending on the purpose of experiment. The transverse beam positions at the entrance and the exit of the undulator are adjusted by monitoring both the horizontal and vertical positions of the beam with strip-line type beam position monitors [6,7].

The optical cavity consists of two silver-coated copper mirrors (M1, M2) having a reflectance of approximately 99.3%. The radiation is extracted from the cavity through a coupling hole of 0.15-mm radius in the mirror M2. The extracted divergent optical beam then is converted into a parallel beam by the beam expander optics consisting of an ellipsoidal mirror (M5) and a parabolic mirror (M6). The parallel optical beam is transported to the next room and then is sent to the experimental facility. In the next room, the optical beam is detected with either an InSb IR detector or a CCD camera after being separated by a cold mirror (M11) into IR and other higher harmonic components.

The latest operation of the LEBRA FEL system demonstrated the FEL wavelength tunability from 1.4 to 5  $\mu$ m with electron beams ranging from 53 to 86 MeV in combination with various K-values. The FEL output power of approximately 10 mJ/ macropulse has been obtained at 1.6  $\mu$ m, which has been measured by means of an IR power meter placed at the same position as the IR detector in Fig. 1. Considerable enhancement of the harmonic components in the visible range also has been observed with the CCD camera, following the intense lasing of the fundamental FEL [5].



Fig. 1. Arrangement of the LEBRA FEL system and the optical beam detecting system. BM1-BM4: bending magnets; Q1–Q4: quadrupole magnets; FC1, FC2: Farady cups; M1, M2: cavity mirrors; M3, M4, M7-M10, M12, M13: total reflection plane mirrors; M11: cold mirror.

488

#### 3. Observation of SASE

An enhancement of the spontaneous radiation in the LEBRA FEL system was initially observed during an adjustment of the electron beam performed to search for a beam condition that allowed maximum FEL power. A large enhancement of the optical power in the cavity has been reproduced by the experiments performed at various combinations of the electron energy and the undulator radiation wavelength. Here, we discuss the results of the experiment performed at an electron energy of 86 MeV.

Typical behavior patterns of the optical power buildup observed at the fundamental radiation of  $1.6\,\mu\text{m}$  are shown in Fig. 2, together with the macropulse shape of the electron beam current. In the experiment, the cavity mirrors were aligned to build up the optical power, which allowed us to observe the large output signal from the InSb detector. The cavity length was completely detuned by shifting the distance between the two mirrors by 1 mm to eliminate the FEL gain, which is sufficient to avoid an overlap of a beam bunch and a previously generated photon pulse considering the RF phase stability [8]. In this case, only the



Fig. 2. The enhancement of the  $1.6 \,\mu\text{m}$  spontaneous emission power observed using the InSb detector (A, vertical scale is  $200 \,\text{mV/div}$ ), compared with the buildup shape without amplification (B, vertical scale is  $20 \,\text{mV/div}$ ). The electron beam pulse shape is shown at the same timing (C, vertical scale is  $20 \,\text{mA/div}$ ). The horizontal scale is  $4 \,\mu\text{s/div}$ .

fundamental component of the spontaneous emission was injected into the InSb detector due to the property of the cold mirror M11. Thus, the buildup waveform of the spontaneous emission in the cavity usually takes the shape shown in Fig. 2B, corresponding to a high reflectance of the mirrors.

The enhancement of the spontaneous emission power shown in Fig. 2A was achieved by adjusting the RF phase for the buncher and the regular accelerating tubes. The enhanced power is not uniform over the entire macropulse; a large enhancement seems to occur intermittently. In the experiment the waveform has varied drastically from pulse to pulse, showing that the quality of the electron beam is critical in satisfying a condition to enhance the power. The enhancement has also been strongly dependent on the RF phase and the magnetic focusing. In some cases, the enhanced power was in excess of 100 times the common level of buildup.

In order to investigate the property of the enhanced optical power, dependence of the optical power on the deflection of the electron beam in the central plane of the undulator field was measured by exciting a steering coil placed at a distance of 0.95 m downstream the undulator entrance. In this measurement, the power buildup was suppressed by deflecting the upstream mirror M2 by 1.5 mrad, in addition to the cavity length detuning. Then, instead of the buildup and decay curves shown in Fig. 2A, we observed the optical power shape as a sum of a square shape due to the contribution from the spontaneous undulator radiation and many unstable, strong peaks with amplitude five times that of the square shape.

If the beam is sufficiently deflected with the steering coil, the amplitude of the spontaneous emission power has to be reduced to less than  $\frac{1}{6}$ , considering the shortening of the effective undulator length [9]. However, the amplitude of the square shape was only reduced to nearly  $\frac{1}{2}$  even with a maximum beam deflection of about 2 mrad, which is due to a wide angular distribution of the spontaneous emission compared with the deflection angle. On the other hand, the amplitude of the peaks in the optical power shape was strongly reduced by the increase in the deflection angle of

the electron beam; the peaks disappeared with the maximum beam deflection. Therefore, evidently the peaks were due to a strong emission of radiation in the last half of the undulator. Furthermore, the large decrease in the amplitude of the peaks that resulted from the beam deflection cannot be explained by the property of the spontaneous emission or a coherent radiation that may be emitted by a fine structure of the longitudinal beam bunch profile. The result suggests the existence of an amplified radiation by the interaction between the electron beam and the undulator radiation. Thus, we conclude that the strong peaks in the optical power shape were due to the amplification of radiation in the undulator by the SASE process.

These facts remind us of the possibility of strong bunch compression in the bending magnet system, which must be sufficient to achieve the bunch length of around 0.3 ps or shorter based on the peak beam current [2,5,10].

On the other hand, however, no indication of enhancement in the higher harmonics has been found on the CCD image monitoring the visible components.

#### 4. Consideration of bunch compression

The linac consists of the prebuncher, buncher, and regular 4-m long accelerating tubes ACC1, ACC2 and ACC3. The phase of the RF fed in each component is adjusted independently, so that the electron bunch can be accelerated at any RF phase in the regular accelerating tubes, which allows a wide variability of the output energy and a fine adjustment of the longitudinal beam property.

As described with the open circles and solid lines in Fig. 3, the energy spectrum of the electron beam, which was measured by means of the  $90^{\circ}$ bending system that worked as a spectrometer, had a broad peak of FWHM 2%. Despite the reduction of beam current in the undulator beam line, SASE has been observed only with this beam condition. Another spectrum described with solid circles and solid lines corresponds to the operation when the maximum beam current was obtained in the undulator beam line, which has a narrow peak



Fig. 3. Differences in the energy spectra, which depend on the linac operation, measured at the exit of the linac. SASE was observed at the spectrum described with open circles. The solid circles correspond to the operation providing the maximum current in the undulator beam line. The spectra were obtained by averaging the data from 2 to  $18 \,\mu s$  in a total 20  $\mu s$  beam pulse duration.

of FWHM 0.5% that represents the approximate minimum energy gradient at the exit of the linac. However, SASE has not been observed with this condition.

The phase of the electron bunch when selfamplification occurred has been deduced from the measurement of the RF phase shift in terms of the peak phase (90°) that results in the maximum beam loading. The deduced values are  $81.5^{\circ}$  in ACC1,  $81.4^{\circ}$  in ACC2, and  $35.1^{\circ}$  in ACC3, respectively. For the beam with 86 MeV at the exit of the linac, the longitudinal energy gradient in the bunch, approximately 0.60 MeV/deg or 0.70%/deg, has been deduced from the bunch phase and the accelerating field in all the regular tubes with linear approximation. The result is in agreement with the value, 0.73%/deg, deduced from another SASE experiment performed with the same procedure at 69 MeV.

According to the design calculation based on the first order beam matrix theory [11], the 90° achromatic bending system causes a path difference factor of -0.86 mm/%, or  $-2.9^{\circ}/\%$  for the displacement of the electron energy. The total path difference, the sum of the path difference factor and the inverse number of the energy gradient,

is  $-1.5^{\circ}/\%$ . The result suggests that considerable bunch compression is possible if the energy gradient at the exit of the buncher is a negative value, e.g. around -0.35%/deg. Thus, it is necessary to precisely simulate the bunch formation process in the prebuncher and the buncher for further investigation of the SASE phenomenon observed with the low-current beam from the conventional linac.

#### 5. Summary

The LEBRA FEL system demonstrated the FEL tunability from 1.4 to  $5 \mu m$ . SASE in the near IR range has been observed using the electron beam with a low macropulse beam current, 40 mA, from the conventional linac of LEBRA, which suggests the formation of a very short bunch with considerable bunch compression in the achromatic bending system. The behavior of the energy distribution in the bunch was estimated in terms of the bunch compression, however, the preliminary data obtained from the experiment is

insufficient to prove the achievement of bunch compression.

#### References

- G. Dattoli, A. Renieri, Nucl. Instr. and Meth. A 507 (2003) 464.
- [2] A. Murokh, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 507 (2003) 417.
- [3] A. Doyuran, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 507 (2003) 392.
- [4] T. Tanaka, et al., Proceedings of APAC'98 (Tsukuba, Japan March 1998) 722.
- [5] Y. Hayakawa, et al., Nucl. Instr. and Meth. A507 (2003) 404.
- [6] T. Suwada, et al., AIP Conference Proc. 319 (1993) 334.
- [7] K. Ishiwata, et al., Proceeding of LINAC2002, Gyeongju, Korea, 2002, p179.
- [8] K. Yokoyama, et al., Proceeding of FEL2003, Tsukuba, Japan, 2003, Nucl. Instr. and Meth. A (2003), these Proceedings.
- [9] C.A. Brau, Free-Electron Lasers, Academic Press, Inc., San Diego, 1990.
- [10] J.N. Galayda, Proceeding of LINAC2002, Gyeongju, Korea, August 2002, p. 6.
- [11] K.L. Brown, SLAC-75 (1972).

# 第1回日本加速器学会年会・ 第29回リニアック技術研究会

PROCEEDINGS OF THE 1st ANNUAL MEETING OF PARTICLE ACCELERATOR SOCIETY OF JAPAN AND THE 29th LINEAR ACCELERATOR MEETING IN JAPAN

> August 4—6, 2004 Funabashi Japan

# 日本大学量子科学研究所

Institute of Quantum Science, Nihon University

# Measurements of the pulse length of the FEL nonlinear harmonics radiation

K.Hayakawa<sup>1,A)</sup>, K.Yokoyama<sup>2A)</sup>, K.Nakao<sup>B)</sup>, I.Sato<sup>A)</sup>, T.Tanaka<sup>A)</sup>, Y.Hayakawa<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Laboratory for Electron Beam Research and Application, Institute of Quantum Science, Nihon University

7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

<sup>B)</sup> Graduate school of Science and Technology, Nihon University

1-8-4 Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8301

#### Abstract

The pulse length of the fundamental and the nonlinear harmonics of the FEL generated at LEBRA have been measured simultaneously by means of Michelson interferometer. The nonlinear harmonics is thought of as the coherent radiation emitted from the micro-bunches corresponds to each harmonics formed by the fundamental radiation. In this measurement, the wavelength of the fundamental radiation is 1500nm, then, the wavelength of the second and third harmonics are 750nm and 500nm respectively. The fundamental radiation is detected by using InGaAs photodiode and the second and third harmonics are detected by using Si photodiode. Measured pulse length of the fundamental radiation is about 65µm and the second and the third harmonics is about 35µm and 43µm of FWHM.

# FEL非線形高調波パルス長の測定

#### 1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設(LEBRA)で発生して いる自由電子レーザーは、当初の予定よりはるかに 高いゲインを有していることが判明した。これは、 加速器最終段の加速管の位相が独立に制御できるこ とから、その下流の運動量アナライザー(90度偏 向系)との組み合わせによって、マグネティックバ ンチャーを構成し、非常に幅の狭い、ピーク電流の 大きなバンチが形成されていると考えられる。バン チ長測定の一手段として、FEL光の自己相関による 干渉パターンの測定を始めた<sup>[1]</sup>。干渉計の半透過鏡 にはカタログに掲載されている中では最長波長の 1500nm用を使用した。この測定中に、非線形高調 波もそれとわかる干渉性を示していることが明らか になったので、その特性を調べるため、基本波と高 調波の同時測定を行なった。



図1. マイケルソン型干渉計、ディテクター及 び鏡の配置。ディテクターはSi 及び InGaAs フォトダイオード。

#### 2. 実験装置

#### 2.1 干渉計

干渉計は図1に示すように、マイケルソン型で、 4枚の全反射鏡、3枚の半透過鏡、4台の光検出器 から構成される。光検出器は基本波用に、InGaAsの フォトダイオード、高調波用にSiのフォトダイオー ドを使用した。FELビームラインの取出しポートか ら大気中に取出された光は、2枚の全反射鏡によっ て、干渉計の光軸に入射される。入射光は半透過鏡 1によって二分割される。反射光はリファレンスに 用いるため、さらに二分割されて、検出器1、2に 導かれる。透過光は半透過鏡3でもう一度分割され、 固定の全反射鏡4と可動の全反射鏡3に導かれる。 の光が戻って再び合流したところで干渉を起す。干 渉光は光検出器3及び4に到達する。基本波の波長 を1500nmにすると2次及び3次高調波の波長はそ れぞれ、750及び500nmになるが、InGaAsフォトダ イオードは800nm以下の波長の光に対してはほとん ど感度を持たない上、基本波の光強度は高調波に比 べて圧倒的に強いため、基本波は波長選択のフィル タリングをする必要はなく、減光措置を施すだけで 測定できる。2次及び3次高調波は共にSi検出器が 感度を持つ波長である。これらはフィルターによっ て分離できるが同時測定をするためにはさらに半透 過鏡を増やさなければならない。この実験の場合、 パルス幅が非常に短いことから、半透過鏡3の基板 を通過する時の屈折率と光速度の違いによる光路長 の違いによって空間的に分離した信号として取出す ことが可能である。

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> E-mail: hayakawa@lebra.nihon-u.ac.jp

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Present affiliation: High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

2.2 データ集積

ディテクター4台からの信号は、増幅した後、 Tektronix社製のオシロスコープTDA3014Bによって 波形表させている。この波形信号をEthernetを介し てパーソナルコンピューターに取り込む。可動鏡は 1軸の移動ステージの上に全反射鏡を固定したもの で、ステッピングモーターによって駆動され、パー ソナルコンピューターからの指示に従って移動する。 移動ステップサイズは、最短25nmである。波形の 取り込み及びステージの移動は加速器のトリガーに 同期して行われ、現状の2Hz運転では全エベントの 取り込みが可能である。

#### 3. 非線形高調波

自由電子レーザーの非線形高調波は、基本波に よって密度変調された電子ビームの放出するコヒー レントな自発放射光だと考えられる。1個の電子の 放出するアンジュレーター光の強さをpとすると、n 個の電子の放出するアンジュレーター光の強さPは  $P = np(1+n|F|^2)$ である。右辺第2項がコヒーレント 放射の部分で、電子数の2乗とForm factor Fの2乗 に比例する。このForm factorを1粒子1次元 (W.B. Colson<sup>[2]</sup>)のモデルで計算すると、コヒーレ ント放射光の強さはFELの強さの次数乗に比例する 事が容易に示される。これが非線形高調波の立ち上 がりの早さがFELの次数倍にみえる理由である。光 パルスの長さについては、FELが飽和している場合 はこの関係が崩れると思われるし、電子の分布も考 慮しなければならないので、簡単ではない。詳しい 解析は行っていないが、非常に単純化して、電子 ビームもFEL光も同じ幅のガウス分布をしていて、 かつアンジュレーター中での光パルスに対する電子 パルスの遅れは無視できると仮定する。FEL光の進 行方向の長さをσとすると、2次の高調波ではσ/2、 3次の高調波に対してはσ/√5となる。逆に、バンチ の長さが光パルスよりずっと長いと仮定すると、2 次の高調波ではσ/√2、3次の高調波に対してはσ/√3 となる。いずれの場合も次数の高い高調波ほど短い パルスになることが予想される。

#### 4. 実験

この実験を行ったときの加速電子エネルギーは 100MeV、アンジュレーターを通過する電流はマク ロパルス内の平均で、50~80mA、アンジュレーター のK値が1.18になるようにギャップを調整し、 1500nmで発振するように調整した。SiのCCDカメラ を装着した分光器で、2次及び3次高調波の波長を 確認し、InGaAsのダイオードアレイを装着した分光 器で基本波の波長を確認した。

#### 4.1 干渉パターン

実験結果の一部を図3. (a, b)に示す。縦軸は光の 相対強度、横軸は可動鏡の位置で、単位はµmであ る。濃く見えるほうが基本波による干渉パターン、 前景になっている方がSiディテクターによって観測 された高調波の干渉パターンである。波長の違いに よって、この程度異なった位置で干渉が観測される。 基本波の干渉している範囲はa,bで少し異なるが、 200µm程度である。高調波の信号で、160µm付近に 見える塊が2次の高調波の、260µm付近に見える塊 が3次の高調波の干渉パターンである。



図2. 基本波及び高調波の干渉パターン(a)は 2次の高調波が強くなるように調整された場 合、(b)は3次の高調波が強くなるように調整 された場合。

#### 4.2 高調波の相対強度

図2の高調波の干渉パターンを比較すると明らか であるが、2次及び3次の高調波の相対的な強さが 変化している。光共振器は銅基盤に銀コートした鏡 を使い、上流側の鏡の中心に穿たれた直径0.3mmの 穴を通して光を取出している。また、高調波の次数 によって放射される光の角度分布が異なる。鏡の向 きによって決まる光軸は必ずしも鏡の中心をとおる とは限らないし、電子ビームの軌道も光軸と完全に 一致しているわけではないであろう。従って、光共 振器の中では各次数の光の強度比が一定であっても、 電子ビーム及び光共振器の調整によって、取出され た光の強度分布が異なっていると考えられる。奇数 次の高調波の角度分布が前方に鋭いピークを持つこ とを考慮すれば、3次高調波が強くなるように調整 された状態が、光軸が鏡の中心を通り、かつ電子 ビームの軌道と一致した状態に近いと考えられる。

#### 4.3 光パルス長

干渉パターンからパルス長を正確に求めるのは、 FELの場合、揺らぎが大きいため難しい。しかしお おまかな値の算出は可能である。図2において、横 軸は鏡の位置を示すスケールであるから、光路長の 変化はこの倍の長さになる。また干渉パターンの長 さは元の光パルスの長さの2倍になる。図2(b)では、 基本波の干渉パターンは半値全幅でおよそ130µm、 3次の高調波はおよそ85µm、2次の高調波図2(a)か ら求めるとおよそ 70µmと見込まれる。3章の単純 化したモデルでは、3次の高調波の長さが説明でき ない。基本波が平坦部を持つような波形をしてなお かつバンチ長が長ければ説明できるが、その場合2 次の高調波の長さ(短さ)がうまく説明できない。 偶数次の高調波の場合、波束の一部しか外部に取出 されないと考えればよいのだが、現在は未解決であ る。

#### 4.4 スペクトル

干渉の測定と平行して、スペクトルの測定を行っ た。図2(b)の状態のときに得られたスペクトルを図 3に示す。電子ビームの状態によってはピークの位 置が移動したり、複数のピークが現れたりする。こ の現象は高調波において特に顕著に見られる。半値 全幅をこれらのスペクトルから読み取った。2次の 高調波のスペクトルは左右非対称になっていて、二 つのピークが重なっていると思われる。メインの ピークの左半幅の2倍を半値全幅とした。これとは 別に、干渉パターンの半値幅を用いて、スペクトル の評価を行った。パルス波形として、あまり不自然 でなければどのような波形を仮定してもほぼ同じ値 になる。半値全幅(FWHM)は図2の横軸のスケール で測った値、基本波と3次高調波については図2(b) から読み取り、2次の高調波については図2(a)から 読み取った。結果を表1に示す。この結果は分光器 で測定した結果と非常によく一致しており、両者の 測定に矛盾がないことを保証している。

表1干渉パターンから導いたスペクトル幅と、干渉 計を用いて測定したスペクトル幅

	FWHM	Interferometer	Spectrometer
1st	65 (µm)	1.0 (%)	0.93 (%)
2nd	35	0.95	0.95
3rd	43	0.5	0.6

#### 5. まとめ

波長1500nmでFELを発振させ、その干渉を測定し ていた時に、高調波も高い干渉性を示すことが観測 された。基本波および高調波の干渉パターンの同時 測定を行い、各次数の光パルス長を評価した。この パルス長から算出したスペクトル幅の値は、分光器 を使ったスペクトルの測定結果とよく一致している。 しかし、パルス長の関係がこのようになる理由はこ の実験からは解明できなかった。



図3分光器で測定した図2(b)の状態における スペクトル。矢印と数字は半値全幅を表す。

#### 参考文献

- K.Yokoyama, et al, "MEASUREMENT OF ELECTRON BUNCH LENGTH AT LEBRA" Proceedings of the 29<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, Narashino, Aug. 4-6, 2004
- [2] W.B.Colson"ONE-BODY ELECTRON DYNAMICS IN A FREE ELECTRON LASER", Phys. Lett 67A(1977)190


# ANALYSIS OF THE GAIN SATURATION IN LEBRA FEL USING GENESIS

Y. Hayakawa<sup>\*</sup> <sup>A)</sup>, I. Sato<sup>A)</sup>, K. Hayakawa<sup>A)</sup>, T. Tanaka<sup>A)</sup>, K. Yokoyama<sup>A)</sup>, T. Kuwada<sup>A)</sup>, A. Mori<sup>A)</sup>, K. Nogami<sup>A)</sup>, T. Sakai<sup>B)</sup>, K. Kanno<sup>B)</sup>, K. Ishiwata<sup>B)</sup>, K. Nakao<sup>B)</sup>

A)Institute of Quantum Science, Nihon University 7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

<sup>B)</sup>College of Science and Technology, Nihon University 7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

#### Abstract

At the Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) of Nihon University the gain saturation of free electron laser (FEL) has been achieved. In order to analyze this phenomenon, the 3D FEL simulation code GENESIS has been modified to treat the optical cavity effect. Measured optical energy and cavity detuning curve are consistent with the results of simulation performed in the condition of 0.75 mm rms bunch length. Waveforms of the saturated FEL macropulse measured using a fast detector indicate that the FEL gain is much stable except the fluctuation of the seed light.

# GENESISによる日大FELの利得飽和の分析

## 1. はじめに

日大電子線利用研究施設 (LEBRA) では 2001 年に 自由電子レーザ (FEL) の first lasing に成功して以来, 利用研究に供給できる品質を目指してリニアックの 安定化を進めてきた<sup>[1]</sup>。これと並行して,連続可変波 長での FEL 発振を実現するために共振器ミラーを銅 基板の銀コートミラーに交換し,利用研究に FEL を 供給するためのビーム輸送系の整備を行ってきた<sup>[2]</sup>。 現在までに波長 885 nm から 6 μm の範囲での発振を 達成しており, FEL 利得飽和と思われる状態が得られ ている。そのため,比較的安定に利用研究への供給が 可能となっている。

LEBRA FEL はパルス駆動の共振器型 FEL である ので,利得飽和の定量的な分析を行うには,マクロパ ルス内での光パワーの成長をシミュレートする必要 がある。しかしながら,現状の共振器型 FEL に対す る研究は,主に t 長波長領域で 1 次元モデルを用いて なされている。LEBRA FEL は比較的短波長である ので,3 次元モデルを用いる方が望ましい。幸い,3D FEL コードである GENESIS が開発され,自己増幅型 (SASE)FEL の実験結果と良い一致を示している<sup>[3]</sup>。 GENESIS は主に 1-pass の計算に用いられているが, 計算終了時に複素波面データを出力することができ る。GENESIS にはショットノイズを扱える利点もあ り,これを用いた繰り返し計算によって共振器型 FEL のシミュレーションを試みることにした。

## 2. GENESIS の共振器型 FEL への適用

### 2.1 波面変換

1-pass 計算後に出力される波面データ (バイナリ データ)には時間方向に波長単位でスライスされた複 素振幅の情報が含まれている。各スライスは格子メッ シュデータとなっている。GENESIS から出力された データは発散波面であるため、次の計算ルーチンの入 カデータとするには、実際の共振器に対応した収束波 面への変換を行う必要がある。共振器型の pass 数は 数 100 回におよび、SASE と比べて計算負荷が大きい ため、簡略化された変換によって現実的な計算時間に 収める必要がある。ここで、

- アンジュレータの出入口が共振器鏡の焦点に近い
- 光パルスの時間方向の変化が緩やか
- 縦収差が無視できる

という仮定で,スライス毎に鏡像を利用した変換を 行うことにした。ここでは,入力スライスと出力スラ イスの各点の共振器鏡に対する鏡像をとり,入力側の 鏡像を円形開口光源として近似し,出力側の鏡像への Fraunhofer 回折を計算することにより位相情報の再 構築を行っている。その際,共振器ロスに合わせて振 幅を調整している。図1はこの波面変換の概念図で ある。

#### 2.2 共振器長 detuning

共振器型 FEL では slippage での相互作用の効率を 上げるために, 共振器長をわずかに短くしてやる必 要があり (detuning), これによって発振の状態が大き く変わる。上記の波面変換において, 波面データのス ライスを detuning に相当する数だけずらしてやれば, GENESIS にこの効果を取り入れることができる。し かし, 波長単位でスライスされているため, 波長の整



図 1: 共振器による波面変換の概念図

<sup>\*</sup>E-mail: yahayak@lebra.nihon-u.ac.jp

Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan (August 4 - 6, 2004, Funabashi Japan)

表 1: シミュレーションで用いたパラメータ

発振波長	2440 nm	
アンジュレータ周期数	50	
アンジュレータ周期長	48 mm	
電子エネルギー	87 MeV	
エネルギー分散	0.4 %	
ピークカレント	35 A	
rms バンチ長	0.75 mm	
ビーム半径	0.41 mm	
$\varepsilon_{x,y}$ (規格化)	$15\pi$ mm mrad	
$\alpha_{x,y}$	1.2, 0.3	
共振器長	6.718 m	
Rayleigh 長	1.468 m	
共振器ロス	2.5 %	

数倍以外の detuning を行うことができない。そこで、 分数的な方法で近似的に detuning 効果を取り入れる ことにした。例えば 0.2 波長分 detuning させる場合、 5 往復毎に 1 スライスずらしている。計算に必要な時 間を考えると実際上,離散的に計算せざるを得ないの で、この方式によるデメリットは少ないと思われる。

## 3. シミュレーションと実験の比較

上記の波面変換を行うコードと GENESIS を組み 合わせた繰り返し計算を実際に行い, 共振器型 FEL のシミュレーションを試みた。計算で使用したパラ メータを表 1 に示している。LEBRA FEL では偏向 磁石によるバンチ圧縮によって 1 ps 以下のバンチ長 の実現が示唆されており, 今回は rms バンチ長として 0.075 mm(1σ:0.5 ps) を仮定している<sup>[4]</sup>。

図2は共振器長が1波長短い条件で実行されたシ ミュレーションの結果である。ノイズから立ち上が り,小信号利得領域を経て飽和に達する様子やパルス の時間構造の変化がわかる。飽和状態で観測された 光パルスの幅が電子ビームの幅の半分程度になって いるのも,自己相関干渉計などによる測定結果と矛盾 していない。また,空間プロファイルも光パワーの成 長とともに Gaussian ビームに近づいていく。これら は実際の FEL の振る舞いに整合しており,今回採用 した波面変換法が有効であることを示唆している。

共振器長 detuning の条件を変えて計算した結果と, 実際に測定されたマクロパルスの波形を比較してみた のが図 3 である。今回測定に使用した検出器 (InSb) は増幅器の線形性があまりよくないので,単純に波 形を比較して評価することはできない。しかしなが ら, FEL のマクロパルス幅や飽和レベルの detuning に よる変化がおおよそ再現できており, detuning 効果の 取り入れにも大きな問題が生じていないことが示唆 される。このシミュレーションが信頼できるならば, detuning が小さい状態での発振では 100 fs 程度の幅 の光パルスが得られていることになるが,安定性の問 題もありこの状態での測定は現状では困難である。

共振器長 detuning に対する光パワーの変化, いわゆる detuning curve を計算し, パワーメータによる実際



図 2: 上):シミュレーションによる FEL の成長の様子; 中):光パルス形状の変化;下):空間プロファイルの変化

の測定値を比較したのが図4である。CWのシステム のように飽和レベルの比較でFELの効率を議論する のは困難であるため、マクロパルス当りで得られる熱 量で比較している。熱量の計算は、共振器鏡の穴から のアウトカップルを0.8%、そこからパワーメータま での輸送系(アルミミラー11枚、CaF2スプリッター1 枚)の効率を70%として見積もっている。シミュレー ションの結果は、detuningが小さいときには利得が小 さく飽和レベルが高くなり、detuningを少し大きくす ると利得が大きくなる反面、飽和レベルが下がるとい う共振器型FELの一般的な振る舞いが再現できてい る。detuning curveの形およびマクロパルス当りの熱 量の比較においても、実験とシミュレーションの結果 は近いものとなっている。共振器の振動といった問 題を考慮すると、かなりよい一致であるといえる。

### 4. 高速検出器による測定

FEL 増幅の振る舞いを調べるため、高速な HgCdZnTe赤外検出器 (プリアンプ:200 MHz)を用い て測定した。図5はそれで得られた波形である。パ ルスの立ち上がりで時間を引き伸ばして拡大すると、 44.8 ns 周期で同じ波形が繰り返されているのがわか る。この周期は, LEBRA FEL の光共振器1往復に要 する時間と一致しており, 128 系列ある発振状態の違 いが見えているものと思われる。この繰り返しの波 形は, 増幅の途中では相似形を保っており, 増幅が頭 打ちになると波形が崩れて収束していく。この挙動 は利得飽和の達成を強く支持している。





図 3: 上):測定された FEL マクロパルス波形とシミュ レーション (破線) の比較; 下):detuning によるパルス 形状の違い (計算)



図 4: 共振器長 detuning 曲線のシミュレーションと実 験結果の比較。シミュレーションで得られた小信号 利得の値も破線で示してある。

また,この測定結果は小信号利得領域でのFEL利得 は極めて安定であり,隣り合ったバンチの変動程度で はほとんど変化していないことを意味している。そ のため,スタートアップにおける揺らぎがそのまま保 存されて増幅し,利得飽和によってようやく履歴が消 失することになる。利得の変動がほとんど無いとい うことは,利得関数のピークで安定して増幅している ことを示唆しており,発振波長に関してもバンチ毎の 違いが少ないことが予想される。このことから,共振 器 FEL の増幅プロセスはショットノイズに起因する 揺らぎを除けば非常に安定した現象であることが窺 える。マクロパルス内でのFELの変動は電子ビーム 変動と FEL 飽和領域でのシンクロトロン振動による ものがメインであると考えられ,これらは共にマイク ロ秒周期の変動である。



図 5: HgCdZnTe 検出器で測定された波形。

## 5. 結論

GENESIS と波面変換コードを組み合わせることに より, 共振器型 FEL のシミュレーションが可能とな り, rms バンチ長 0.075 mm という条件で計算された マクロパルスの波形や熱量は, 実験で得られたものと 比較的よく一致していた。この結果から, GENESIS は共振器型 FEL に対しても有用なシミュレータであ り, 定量的な分析や予測の手段として期待できる。

また, 高速な検出器で得られた波形は FEL 増幅プ ロセスの情報をわかりやすい形で含んでおり, 利得飽 和の達成を示していた。

## 6. 謝辞

この研究は文部科学省・学術フロンティア推進事 業および日本大学学術研究助成金 (H15 年度/一般 (個 人)) の助成を受けている。

## 参考文献

- Y. Hayakawa, et al., Nucl. Instrum. Methods A 483, (2002) 29.
- [2] Y. Hayakawa et al., Proc. of 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, (2002) 272.
- [3] S. Reiche, Nucl. Instrum. Methods A 429 (1999) 243.
- [4] K. Hayakawa et al., "Measurements of the pulse length of the FEL nonlinear harmonic radiation at LEBRA", in these proceedings.

## **GUIDING OPTICS SYSTEM FOR LEBRA FEL USER FACILITY**

T. Tanaka<sup>\*</sup>, K. Hayakawa, Y. Hayakawa and I. Sato, LEBRA, Institute of Quantum Science, Nihon University, 7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501 Japan

#### Abstract

The FEL guiding optics system for the LEBRA user's experimental facility was completed in 2003. The optical beam extracted from the Infrared FEL resonator has been guided through a long vacuum system to the user's experimental rooms, where a maximum of 17 aluminiumcoated mirrors have been used in the guiding optics. The maximum length of the optical line is approximately 50 m. The divergent FEL beam extracted from the resonator through a coupling hole has been converted into a parallel beam. An approximately identical diffraction pattern of a guide laser was observed at the output ports of the experimental facility. The guiding optics has two FEL monitoring ports, each containing a CaF<sub>2</sub> beam sampler and a total reflection mirror, which has advantages for simultaneous measurement of the power and the spectrum of the FEL during user's experiments. The transport efficiency of the guiding system depends on the FEL wavelength and the radius of the coupling hole in the resonator mirror.

#### **INTRODUCTION**

Use of the infrared free-electron laser (FEL) for experiments in medical science and material science was started in 2003 at the Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) of Nihon University. The FEL guiding optics completed prior to the beginning of user's experiments was designed to transport the FEL and its higher harmonic undulator radiations. The lights in the wavelength region of 0.2 to 6  $\mu$ m are extracted from the FEL resonator through a coupling hole in one of the resonator mirrors. After converted to a parallel beam, the lights are transported to user's experimental rooms using aluminium-coated plane mirrors. The top view of the LEBRA accelerator facility and the user's experimental facility is shown in Fig. 1.

This paper reports on the present status of the LEBRA FEL system and the optical guiding system for the FEL user facility.



Fig. 1. Top view of the LEBRA accelerator facility and the user's experimental facility.

<sup>\*</sup>E-mail address: tanaka@lebra.nihon-u.ac.jp

## THE FEL SYSTEM OF LEBRA

Table 1 shows the specifications of the infrared FEL system installed in LEBRA. A schematic layout of the system is shown in Fig. 2. The FEL guiding optics system in the accelerator room is also shown in Fig. 2. The planar FEL undulator consists of Halbach-type NdFeB permanent magnets [1]. The electron beam wiggles in a vertical direction in the undulator so that the focusing field of the undulator binds the electron beam orbit in a horizontal direction.

The highest electron energy is currently restricted to 100 MeV due to the maximum klystron output rf power. The minimum undulator gap width was reduced by 5 mm compared with the earlier design specification by replacing with a thinner undulator vacuum duct, which increased the maximum undulator *K*-value from 1.5 to 2. The wavelength of the FEL is variable in the range from 0.9 to 6.5  $\mu$ m, which is accomplished by adjusting the electron beam energy and the undulator gap width i.e. the undulator *K*-value [2].

The electron beam from the linac has a longitudinal bunch structure with a period of 105 mm corresponding to the accelerating rf of 2856 MHz. The separation D between the two resonator mirrors is 6.718 m, i.e. 64 times the free space wavelength of the microwave. The curvature radius R of the resonator mirrors was decided to be 4.0 m. Then the Rayleigh length  $L_R$  of the FEL in the resonator, given by the relation [3]

$$L_{\rm R} = \sqrt{D(2R - D)/2},$$
 (1)

Table 1. Specifications of the LEBRA infrared FEL system.

Maximum electron beam energy	125	MeV
Maximum undulator K-value	2	
Micropulse beam current	> 20	А
Period of undulator field	48	mm
Number of periods	50	
FEL wavelength range	0.6 - 6	μm



Fig. 2. Schematic layout of the LEBRA FEL system and the FEL guiding optics system in the accelerator room.

is 1.47 m, which is slightly longer than the half of the undulator length. For the resonator mirrors, silver-coated copper mirrors with a diameter of 25 mm were manufactured at Rocky Mountain Instrument Co. (RMI). The nominal reflectance of the mirrors is greater than 99.3 % for the wavelength range from 1 to 20  $\mu$ m. The FEL power is extracted from the resonator through a small coupling hole on the center of the upstream mirror.

The radius a of the coupling hole at the mirror in current use is 0.15 mm. Provided that the FEL in the resonator is a Gaussian beam, the FEL beam radius w on the surface of the resonator mirror is given by

$$w = \sqrt{\frac{\lambda_{\rm L} L_{\rm R}}{\pi}} \{ 1 + (D/2L_{\rm R})^2 \}, \qquad (2)$$

where  $\lambda_{\rm L}$  is the FEL wavelength. Then the coupling coefficient  $\kappa$  of the hole, defined as a ratio of the optical power contained in the cross section of the hole to the total power incident on the mirror, is given as

$$\kappa = 1 - \exp(-2a^2 / w^2).$$
 (3)

For the FEL wavelength of 0.9  $\mu$ m, obtained with the electron beam of 100 MeV and the *K*-value of 0.93, the coupling coefficient deduced from Eq. (3) is 0.017. Therefore the sum of the mirror loss and the external coupling loss for each round-trip of lights in the resonator is approximately 3.1 % of the total power.

Lasing by this system has been experimentally confirmed over the *K*-value range from 1 to 2, which suggests a broad variability of FEL wavelength at fixed electron energy. Lasing at 0.6  $\mu$ m is feasible with the present system by increasing the electron energy up to 125 MeV, though the estimated total loss in each round-trip increases to about 5 % due to a decrease of the mirror reflectance and an increase of the coupling loss.

#### THE BEAM EXPANDER SYSTEM

The FEL extracted from the resonator through the small coupling hole has a divergence angle due to a diffraction effect referred to as the Fraunhofer diffraction. For the first dark ring or the central core of the diffraction pattern that contains 84 % of the extracted optical power, the divergence angle  $\theta$  of the radius is approximated as [4]

$$\theta = \frac{3.833\lambda_{\rm L}}{2\pi a}.\tag{4}$$

For the 5  $\mu$ m fundamental FEL, the coupling-hole radius of 0.15 mm causes the divergence of the core radius with  $\theta$ = 20 mrad. The maximum distance between the FEL output mirror and the user's port is approximately 50 m. Therefore, a conversion optics system is necessary for efficient guiding of the light beam to user's experimental rooms. In the optical guiding system of LEBRA, the divergent beam has been converted to a parallel beam by means of a beam expander system consisting of an ellipsoidal mirror and a parabolic mirror. The expander mirror system was manufactured and aligned by CANON Inc..





Fig. 3. Geometrical configuration and ray trace of the beam expander system. The rear surface of the upstream mirror lies at the position equivalent to one of the focal points of the ellipsoidal mirror.

The geometrical configuration of the mirrors in the expander system is shown in Fig.3. The basic idea of the optics system is the same as which was installed in FEL-SUT MIR FEL beam line [5]. The FEL extracted through the coupling hole in the upstream mirror is reflected with the primary and the secondary plane mirrors, and then directed toward the ellipsoidal mirror. The optical path length between the coupling hole and the ellipsoidal mirror decided to be approximately 2.5 m so that the rear surface of the upstream mirror or the exit of the coupling hole is placed at the position equivalent to one of the focal points of the ellipsoidal mirror. Therefore the divergent light beam which comes out of the coupling hole is focused at another focal point of the ellipsoid.

As seen in Fig. 3, the ellipsoidal mirror and the parabolic mirror have been aligned to form a confocal configuration so that the light beam, once focused at the common focal point, is converted to a parallel beam by the parabolic mirror, where the focal length is 420 mm for both mirrors. These mirrors have a common central axis parallel to the FEL resonator axis. Then, the collimated beam obtained at the exit of the beam expander has approximately the same profile as that on the surface of the ellipsoidal mirror.

## PARALLEL BEAM TRANSPORT AND FEL MONITOR SYSTEM

As seen in Fig. 2 the output parallel beam from the expander chamber is sent to the next room through a rectangular chicane section. This section was installed to suppress the leakage of gamma rays and neutrons to the

next room through the vacuum duct in the shielding wall. Concrete, lead and plastic blocks surrounding the fourth mirror chamber in the chicane section effectively shield the direct radiations from the electron beam dump.

The parallel beam is guided to nine separate experimental rooms by switching the beam line with retractable plane mirrors. The guiding system in the user's facility was installed in the pit under the floor. Every switching section is equipped with a total reflection mirror (aluminium coated) and a partial reflection mirror ( $CaF_2$  plate), which allows for parallel experiments in the different rooms.

For the purpose of monitoring and control of the FEL lasing during user's experiments, two monitor chambers have been inserted in the midstream of the guiding system. Each chamber contains a  $CaF_2$  beam sampler and a total reflection mirror for alternate monitoring of high intensity fundamental FEL and higher harmonics during user's experiments, or low intensity spontaneous emission during electron beam adjustments.

The FEL monitor chambers and associated optics placed in the large experimental hall are shown in Fig. 4. The output from the upstream side chamber has been used for the measurement of the FEL macropulse waveform by means of an InSb detector. The output from another chamber has been used for the measurement of the FEL macropulse energy and the spectra of higher harmonics. Use of separate beams in simultaneous measurement of different FEL properties requires no wide-band half mirror. Also, it allows easy alignment of the devices on the optical base.

The wavelength of the fundamental FEL has not been measured directly in the wavelength range longer than 1.6  $\mu$ m due to the restricted range of the array detector and the spectrometer in LEBRA. Instead, the spectra of the higher harmonics in the visible region have been used to extrapolate the wavelength of the fundamental FEL.



Fig. 4. The picture of the FEL monitor chambers and associated optics on the optical base. Each chamber contains a  $CaF_2$  beam sampler and a total reflection mirror for an alternative use.

## CONSIDERATIONS ON THE POWER LOSS IN THE GUIDING SYSTEM

The radius of the plane mirrors used in the guiding system downstream from the beam expander is 50 mm, which results in an effective radius of 35 mm due to the reflection angle set at 45 °. The minimum inner radius of the vacuum duct is about 25 mm. Therefore, the aperture of the vacuum duct is the main restriction for the transport efficiency of the FEL power except for the mirror reflectance.

The profile of the parallel light beam transported to the user's facility is primarily determined by the wavelength of the light, the radius of the coupling hole in the upstream mirror, and the distance between the coupling hole and the ellipsoidal mirror. From Eq. (4) the core radius  $a_A$  of the diffraction pattern at the ellipsoidal mirror is given by

$$a_{\rm A} = \frac{3.833\lambda_{\rm L}d}{2\pi a},\tag{5}$$

where d (= 2.5 m) is the distance between the coupling hole and the ellipsoidal mirror. The radius is assumed to be conserved in the travel to the experimental rooms.

The guiding system was originally designed to use a resonator mirror with a coupling hole of 0.5 mm radius for the lasing in the wavelength range of 5  $\mu$ m or longer, where the core radius is greater than 15 mm but still less than the inner radius of the vacuum duct. On the other hand, the mirror with the coupling hole of 0.15 mm radius in current use was intended for use in lasing at the wavelengths shorter than 2  $\mu$ m by taking into account the coupling coefficient. For this mirror, the core radii of the FELs with the wavelength of 2, 3, 4 and 5  $\mu$ m are approximately 20, 30, 40 and 50 mm, respectively.

Thus, the use of the current mirror for lasing in the wavelength range longer than 3  $\mu$ m results in a large

power loss due to the eclipse caused by the aperture of the vacuum duct.

The current FEL system takes at least 1 day to replace the mirror. However, a more efficient optical beam transport and a relatively high coupling coefficient by an optimised mirror will allow for the use of considerably higher FEL power at the user's experimental rooms for longer wavelength FELs.

### **SUMMARY**

The FEL in the wavelength range from 0.9 to 6.5  $\mu$ m has been lased with the LEBRA infrared FEL system. The divergent beam extracted through a small coupling hole in the FEL resonator mirror has been converted into a parallel beam with the beam expander system consisting of an ellipsoidal mirror and a parabolic mirror. The transport efficiency for long-wavelength FELs is low due to the large radius of the parallel beam. However, the efficiency in the long wavelength region can be improved by replacing the current mirror with a resonator mirror which has a larger coupling hole.

#### REFERENCES

- [1] K.Halbach, Nucl. Instr. and Meth. 187 (1981) 109.
- [2] T.Tanaka et al., "Tunability and Power Characteristics of the LEBRA Infrared FEL", FEL2004, Trieste, Italy, Aug. 2004.
- [3] H.Kogelnik and T.Li, Applied Optics 5, No.10 (1966) 1550.
- [4] M.Born and E.Wolf, Principles of Optics, Cambridge University Press (1999).
- [5] K.Nomaru et al., Nucl. Instr. and Meth. A445 (2000) 379.

## TUNABILITY AND POWER CHARACTERISTICS OF THE LEBRA INFRARED FEL

 T. Tanaka<sup>\*</sup>, K. Hayakawa, Y. Hayakawa, A. Mori, K. Nogami, I. Sato, K. Yokoyama<sup>+</sup>, LEBRA, Institute of Quantum Science, Nihon University, 7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501 Japan K. Ishiwata, K. Kanno, K. Nakao, T. Sakai, Graduate School of Science and Technology, Nihon University, 7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501 Japan

#### Abstract

The use of the infrared (IR) Free-Electron Laser (FEL) in medical science and material science started in October 2003 at the Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) of Nihon University. The FEL resonator which consists of silver-coated copper mirrors has demonstrated a wavelength tunability ranging from 0.9 to 6.5  $\mu$ m as a function of the electron energy and the undulator K-value. The wavelength dependence of the FEL output power has been measured in terms of different electron energies and different undulator K-values. At about 2 µm, an FEL energy of roughly 25 mJ/macropulse has been obtained at the FEL monitor port, which corresponds to the peak power of 1 to 2 MW, provided that the FEL pulse length is less than 0.5 ps that resulted from the measurement by the autocorrelation method. A power decrease observed in the long-wavelength range has resulted from the wavelength dependence of the coupling coefficient of the FEL resonator mirror and the transport efficiency of the FEL guiding optics.

#### INTRODUCTION

Since the first lasing at 1.5  $\mu$ m by the LEBRA FEL system in 2001 [1], efforts have been made to achieve the saturation of the FEL power, and to stabilize the pulse-to-pulse power level.

In the early lasing experiment in the infrared region, the FEL resonator consisted of dielectric multilayer mirrors optimised for lasing at a narrow wavelength range of around 1.5  $\mu$ m. The mirrors were easily damaged by a high optical power. However, this suggested that the property of the LEBRA FEL system including the electron beam is sufficient for intense lasing.

The resonator mirrors were changed to silver-coated copper mirrors in August 2003, which was intended to bring about an early beginning of user's experiments by a wide-range variability of the FEL wavelength and a high mirror tolerance for an intense FEL power. The FEL beam has been extracted from the mirror placed upstream from the undulator through a small coupling hole, and the FEL beam has been successfully transported to user's experimental rooms by the optical guiding system. The user's experiments in medical science and material science began in October 2003.

This paper reports on the improvement of the LEBRA FEL system, the result of the experiments on the wavelength variability and the power characteristics. The current specifications and arrangement of the FEL system are expressed elsewhere [2].

## **IMPROVEMENT OF THE FEL SYSTEM**

#### Lasing by dielectric multilayer mirrors

Improvement of the FEL power stability has been an important problem for user's experiments. The uniformity of the electron beam energy and current in macropulse duration was improved by the reduction of the phase fluctuation of the accelerating rf in the linac [3]. Although it contributed to the increase of the FEL power, the improvement did not show a significant effect on the stability. Use of the dielectric multilayer mirrors with insufficient tolerance for high power FEL resulted in damage to the mirrors by the FEL before its saturation, which led to difficulty in the investigation of the stability.

In a series of lasing experiments using the dielectric mirrors, the 1.5  $\mu$ m FEL was observed by detecting the light transmitted through one of the mirrors, where only a fraction of the light beam stored in the resonator was detected using the transmission property of the mirrors.

#### Vibration and drift of the mirrors

Besides the tolerance for the optical power, there were problems of the vibration of the mirrors and the drift of the mirror separation, which was found from the observation of the interference pattern by the alignment laser lights that reflected on the two mirrors in the resonator [4]. The drift of the mirror separation resulted from a change in room temperature. However, the behaviour of the temperature dependence has not yet been well understood. The slow drift of the mirror separation has been compensated for by adjusting a piezo device manually. The vibration of the mirrors resulted from the vibration of the mirror chambers, which was caused by the water flow for cooling of the bending magnets in the beam transport line, which suggested a lack of flexural rigidity of the mirror chamber's frame bases. The amplitude of the vibration in the bases, measured with a laser displacement gauge, was suppressed from several hundred nm to within 20 nm (limit of measurement) by the reinforcement of the frames, which was made with 6mm thick steel plates attached to the side faces of the bases.

<sup>\*</sup>E-mail address: tanaka@lebra.nihon-u.ac.jp

<sup>&</sup>lt;sup>+</sup>Present address: KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801 Japan

#### Lasing by silver-coated copper mirrors

The FEL guiding optics system for user's experiments was constructed in June 2003. This system was designed to use an external-coupling mirror which has a small coupling hole. Since August 2003 the silver-coated copper mirrors have been used for the lasing experiments corresponding to the new optical guiding system. The nominal reflectance for the mirrors is greater than 99.3 % in the wavelength range longer than 0.9  $\mu$ m. The FEL has been extracted from the mirror placed upstream from the undulator through a coupling hole of 0.15 mm in radius.

The silver-coated copper mirrors demonstrated a high performance. The saturation of the FEL power has been observed for the wavelength range from 0.9 to 6.5  $\mu$ m. There has been no evidence of damage so far by the saturated FEL power.

Provided that the FEL in the resonator is a Gaussian beam, the coupling coefficient  $\kappa$  of the coupling hole is given by [5]

$$\kappa = 1 - \exp(-2a^2 / w^2),$$
 (1)

where *a* is the radius of the coupling hole, *w* the FEL beam radius on the surface of the resonator mirror that is given as a function of the FEL wavelength  $\lambda_{\rm L}$ , the Rayleigh length  $L_{\rm R}$  in the resonator and the separation *D* between the two resonator mirrors by

$$w = \sqrt{\frac{\lambda_{\rm L} L_{\rm R}}{\pi}} \{ 1 + (D/2L_{\rm R})^2 \} \,. \tag{2}$$

Using the parameters for the LEBRA FEL system, D = 6.718 m and  $L_{\rm R} = 1.47$  m, the wavelength dependence of the coupling coefficient is approximated as

$$\kappa = 0.687 \frac{a^2}{\lambda_{\rm r}} \,, \tag{3}$$

where the units of *a* and  $\lambda_{\rm L}$  are mm and  $\mu$ m, respectively. For instance the coupling coefficient of the 1.5  $\mu$ m FEL is 0.0103.

The divergent FEL beam extracted from the resonator through the coupling hole has been converted to a parallel beam in the expander system which consists of an ellipsoidal mirror and the parabolic mirrors. Then, the optical size of the collimated beam is determined by the diffraction pattern on the surface of the ellipsoidal mirror.

## **EXPERIMENTAL SETUP**

Fig. 1 shows a schematic layout of the FEL system and the guiding optics system from the accelerator room to the large experimental hall. Also, the experimental setup is shown in Fig. 1. All the measuring devices for monitoring of the FEL have been installed in the large experimental hall.

The macropulse waveform of the FEL and the spontaneous emission were observed with an  $LN_2$ -cooled InSb detector in combination with a focusing lens or neutral density filters depending on the intensity of the light. The light was picked up with a CaF<sub>2</sub> beam sampler or an aluminium total reflection mirror in the first FEL monitor chamber.

The light picked up from the second FEL monitor chamber can be divided into the infrared components and the visible components with a cold mirror as shown in Fig. 1. A simultaneous measurement is possible for the spectra of the higher harmonics in the near infrared to the visible region and the fundamental FEL power, if the FEL wavelength lies in the range where the absorption of the fundamental FEL in the cold mirror is negligibly small.

The optical power of the FEL in a wavelength range longer than 2  $\mu$ m was measured by placing the power meter on the upstream side of the cold mirror. Then, the FEL power and the spectra of the higher harmonics were measured alternately. The FEL power was measured as an integrated energy over the macropulse duration of 20  $\mu$ s by using a pyroelectric element.



Fig. 1. Schematic layout of the FEL system, the FEL guiding optics system, and the experimental setup. The macropulse waveform, the power and the spectrum of the FEL have been measured in the large experimental hall in order to monitor the FEL during user's experiment. The intense FEL has been picked up with a  $CaF_2$  beam sampler in each FEL monitor chamber.



Fig. 2. An example of the macropulse waveform of the FEL lased at 5.75  $\mu$ m (a). Also shown is the electron beam macropulse current (b).

Fig. 2 shows an example of the macropulse waveform of the FEL measured at a wavelength of 5.75  $\mu$ m, where the FEL power was saturated in 8  $\mu$ s from the beginning of the electron beam injection into the FEL system.

The macropulse energy of the FEL was measured using a pyroelectric element with an injection window of  $24\times24$  mm<sup>2</sup>, where no focusing device was placed in front of the element. In the experiment, the measured macropulse energy was calibrated only to the fraction contained in above square region in the FEL monitor chamber. It is assumed that the optical beam profile at the pyroelectric element has approximately the same size and shape as in the FEL monitor chamber. Then, the macropulse energy of 2 mJ for the case of Fig.2 was deduced from the measurement.

The electron beam from the linac has been bunched every period of the 2856 MHz RF. From the FWHM of the FEL macropulse in Fig.2, the average energy in each saturated FEL micropulse is estimated to be 0.064  $\mu$ J. An FEL micropulse length was deduced to be less than 0.5 ps for the wavelength of 1.5  $\mu$ m from a measurement with the autocorrelation method [6]. As a result, the micropulse energy of 0.064  $\mu$ J corresponds to a peak power greater than 0.1 MW. The maximum FEL energy obtained in the lasing experiment was 25 mJ at a wavelength around 2  $\mu$ m, which corresponds to the micropulse peak power of nearly 2 MW.

## **TUNABILITY OF THE WAVELENGTH**

The result of the experiment on the FEL wavelength tunability is shown in Fig. 3, where the rhombus-shaped data points show the wavelengths measured in terms of the various undulator gap widths for the fixed electron energy  $E_{\rm e}$ . The 2D analytical expression for the fundamental sinusoidal component of the undulator peak field  $B_0$  is given as [7]

$$B_0 = 2B_r \{1 - \exp(-2\pi h / \lambda_U)\} \times \exp(-2\pi g / \lambda_U) \frac{\sin(\pi / 4)}{\pi / 4}, \qquad (4)$$

where  $B_r$  (= 1.2 T) is the remanent field of the permanent magnet,  $\lambda_U$  (= 48 mm) the undulator period, *g* the undulator half gap width, *h* (= 35 mm) the block height of the magnet [7]. The dependence of the wavelength on the undulator gap width was calculated from the magnetic field given by Eq. (4) as shown by the curves in Fig. 3. The electron energy has an ambiguity within ±1 % due to the momentum acceptance of the electron beam analysing system. Therefore, the curves were fitted to the experimental results by a small correction for the electron energy. The good agreement with the experimental result suggests that the undulator magnetic field is well described by Eq. (4).

The FEL lasing is possible over the range of g from 12 to 18 mm, which makes change of the *K*-value from 1.99 to 0.91. Thus, the FEL wavelength can be varied continuously to 1/2 of the wavelength at the minimum gap width for fixed electron energy.



Fig. 3. The FEL wavelength measured as a function of the undulator half-gap width for fixed electron energies. The curved lines show predicted wavelength dependences on the gap width.

## POWER AT THE FEL MONITOR PORT

Fig. 4 shows the dependence of relative FEL power on the electron energy and the FEL wavelength, which was measured as the macropulse energy using the pyroelectric element. The wavelength was changed by the adjustment of the undulator gap width with the electron energy fixed.

The experiment for the same electron energy was run in one machine shift, therefore the relative change of the power dependent on the wavelength was obtained with approximately the same electron beam condition. On the other hand, the relative power between the different electron energies involves the difference of the electron beam condition due to the difference of the beam emittance, the energy spread, and the beam focusing



Fig. 4. Relative FEL power obtained with different electron beam energies.

parameters. Also, the absolute value and stability of the FEL macropulse energy has been strongly dependent on the beam handling and the alignment of the resonator mirror. However, the result shown in Fig. 4 gives a good indication of the power available at the user's port.

## ESTIMATION OF THE POWER IN THE RESONATOR

The macropulse energy measured at the FEL monitor port represents the energy contained in the power meter injection window area of  $24\times24$  mm<sup>2</sup>. By a simple assumption that the profile of the parallel beam obtained at the output of the expander system is conserved at the FEL monitor chamber, the detection efficiency  $\varepsilon_d$  of the power meter for the total extracted energy is given by [8]

$$\mathcal{E}_{\rm d} = 1 - J_0^2 (2\pi a A / d\lambda_{\rm L}) - J_1^2 (2\pi a A / d\lambda_{\rm L}), \quad (5)$$



Fig. 5. The FEL power obtained at  $E_e = 52$  MeV. Open circles: raw data divided by  $T_M$ , stars: corrected for  $\varepsilon_d$ , black circles: corrected for  $\varepsilon_d$  and  $\kappa$ . The error bars represent the fluctuation of the macropulse energy and the macropulse length in the experiment.

where d (= 2.5 m) is the distance between the coupling hole in the resonator mirror and the ellipsoidal mirror in the expander system, and the area of the power injection window was approximated by a circle with the radius A( = 13.5 mm).

From Eqs. (3) and (5), the micropulse peak FEL power in the resonator can be estimated by applying a factor

$$k = \frac{1}{\mathcal{E}_{\rm d} \kappa \tau_{\rm L}} \frac{T_{\rm RF}}{T_{\rm M}} \tag{6}$$

to the macropulse energy measured at the FEL monitor port, where  $\tau_{\rm L}$  is the FEL micropulse length,  $T_{\rm RF}$  the period of the micropulse,  $T_{\rm M}$  the FEL macropulse length.

The effect of corrections for  $\varepsilon_d$  and  $\kappa$  on the FEL power measured at  $E_e = 52$  MeV is shown in Fig. 5, where the open circles are the raw data divided by  $T_M$ , the stars corrected for  $\varepsilon_d$  (the same vertical scale as raw data), the black circles corrected for  $\varepsilon_d$  and  $\kappa$  (corresponding to the power in the resonator). The FEL macropulse length was measured for each wavelength. Fig. 4 shows a decrease of the power in the wavelength region longer than 3  $\mu$ m at the FEL monitor port. However, the result of corrections for  $\varepsilon_d$  and  $\kappa$  suggests that the power in the resonator was not necessarily decreased in this region.

## **SUMMARY**

Saturation of the FEL power was achieved in the wavelength range from 1.0 to 6.5  $\mu$ m by use of silvercoated copper mirrors in the FEL resonator. The property of the wavelength variability is in agreement with the theoretical prediction. The FEL power measured at the FEL monitor port has shown a decrease of saturated power in the wavelength region longer than 3  $\mu$ m. However, the power in the FEL resonator has not been necessarily decreased, considering the detection efficiency and the coupling coefficient of the externalcoupling mirror.

#### REFERENCES

- [1] Y.Hayakawa et al., Nucl. Instr. and Meth. A 483 (2002) 29.
- [2] T.Tanaka et al., "Guiding optics system for LEBRA FEL user facility", FEL2004, Trieste, Italy, Aug. 2004.
- [3] K.Yokoyama et al., Nucl. Instr. and Meth. A 507 (2003) 357.
- [4] K.Nakao et al., Proc. of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, (2003) 396 (in Japanese).
- [5] H.Kogelnik and T.Li, Applied Optics 5, No.10 (1966) 1550.
- [6] K.Hayakawa et al., Proc. of LINAC2004, XXII International Linear Accelerator Conference, Lubeck, Germany, Aug. 2004 (to be published).
- [7] K.Halbach, Nucl. Instr. and Meth. 187 (1981) 109.
- [8] M.Born and E.wolf, Principles of Optics, Cambridge University Press (1999).