

電子ビーム光学研究室

Advanced Electron Beam Physics Laboratory

主任研究員 新 竹 積
SHINTAKE, Tsumoru

当研究室は、播磨研究所における次世代の放射光源である硬 X 線領域自由電子レーザー (XFEL) の実現に向け、その電子源の技術開発を担当している。X 線領域にて FEL を動作させるには、反射ミラーを用いない自己増幅型自由電子レーザー (SASE) 方式が最適と考えられているが、技術的に極めて高品質の電子ビームを、安定に加速し、長さ数十メートルに及ぶアンジュレータの中を精度良く通過させる必要がある。当研究室では、低エミッタンス電子源、C バンド高電界加速器、高精度ビーム位置制御技術などの技術開発を行っている。また物理科学研究 (高度干渉性放射光利用技術開発研究) に参加し、SCSS 計画 (軟 X 線領域 FEL) の建設に協力している。

1. 低エミッタンス電子銃の開発研究 (新竹, 稲垣, 渡川, 馬場 ^{*1})

X 線 FEL には、規格化エミッタンスにして 2π -mm-mrad という、従来の加速器で実現されていたエミッタンスの 10 分の 1 という、極めて高品質の電子ビームが要求される。エミッタンスをできる限り小さくする目的から、カソード面積はできる限り小さくするほうが望ましく、直径 3 mm という小面積の CeB6 単結晶を熱カソード材料に採用し 40 A/cm^2 程度の高電流密度で電子を発生させている。さらに空間電荷によるエミッタンス増大を抑えるため、500 kV というきわめて高い電圧で、電子を一気に加速する方式とした。これを成功させるには、カソードを $1,500^\circ\text{C}$ に加熱する技術、500 kV の高電圧を安定に電子銃に印加する技術の開発が不可欠である。

当研究室では、高電圧技術をパルス型大電力クライストロン周辺から、カソードのハンドリング、過熱技術を電子顕微鏡のカソードや半導体引き上げ溶解炉に学び、これを進化させて、500 kV 電子銃 1 号機を開発し、平成 15 年 12 月より運転を開始した。その結果、

(1) 高電圧プロセッシングを、運転開始からわずか数時間にて終了し、500 kV を安定に印加できた。

(2) ビーム電流 1 A の電子ビームが安定に供給されている。

(3) ビームエミッタンスは 1.1π -mm-mrad (at 1 Amp., 500 kV) ときわめて優れたものである。

(4) 運転開始から 3ヶ月を経た現在でも、カソードの劣化は見られない。

(5) 電流量、ビーム位置ともにきわめて安定なビームが得られている。

なお X 線 FEL では発生する電子ビームの擾乱がそのまま X 線のゆらぎに反映するため、きわめて安定なシステムが要求される。特にヒーター回路電流の回り込みがビームを不安定にする場合があるので、我々は、グラファイトヒーターによる輻射熱にて $1,500^\circ\text{C}$ まで加熱するヒーターを開発した。グラファイトは高温でも機械的、電気的に安定であり、カソードの加熱温度、カソード位置が常に一定となり、ビーム安定化に役立っている。また電子銃の高電圧電源

は、C バンド加速器のクライストロン向けに開発されたインバータ方式の充電器を持つモジュレータ電源であり、電圧安定度 0.2% p-p という優れた性能を有することも、安定性に寄与している。

来年度には電子銃の下流にプレバンチャー空洞を設置して、電子ビームを高周波電界により 10 ピコ秒程度のバンチに圧縮し、ピーク電流を FEL 発振に必要な数百 A まで増大させる実験を行う。またエミッタンスを精密に測定しビーム挙動を調査する。

2. C バンド高電界加速器の要素開発 (新竹, 稲垣, 馬場 ^{*1}, 松本 ^{*2})

SCSS 計画では、できるだけ装置の全長を短くする目的から、C バンド周波数の高電界加速器を設計に取り入れている。C バンドは新竹等が KEK (高エネルギー加速器研究機構) にてリニアコライダー計画向けに 1995 年度より開発した技術である。50 MW ピーク出力の C バンドクライストロン 2 本を並列運転し、パルスコンプレッサーを通して 4 本の 1.8 m 長加速管に RF を供給すると、設計では 35 MV/m 以上の加速電界が得られる。従って、SCSS の 1 GeV ビームは約 30 m にて得られることになり、従来の半分以上の長さで済むため、施設のコストが大幅に削減できるメリットがある。

本年度は、C バンドクライストロン向けのモジュレータ電源の性能試験、信頼性試験を、電子銃の試験と平行して継続的に行い、必要な部分については改善措置を行ってきた。その結果、モジュレータ電源、インバータ電源ともに現在、安定な動作が確認されている。

関連の技術として冷却水ループに入れた電気ヒーターとコントロールバルブとの組み合わせによる温度制御システムを開発した。加速管の直前に設置することにより、反応時間約 30 秒という、すばやい応答を得ることができ、C バンド加速器の運転立ち上げや、モード変更後にすぐに安定したビームを供給できるであろう。

来年度は、C バンドの加速管に大電力 RF を投入し、その高電界での性能試験を実施したい。

3. レーザー位置アライメントシステムの開発 (新竹, 稲垣, 渡川, 田中, 佐伯^{*1})

X線をアンジュレータの中で増幅し,十分に飽和まで持っていくためには,電子ビームの軌道をできる限り直線に保持しなくてはならない。それには,

(1)アンジュレータの1セグメント(4.5 m)の中での磁場調整が高精度になされていること。

(2)セグメント間に置かれたQ収束磁石等の位置がまっすぐにアライメントされていること。

このうち(1)については,X線超放射物理学研究室がアンジュレータの開発を担当しており,ほぼ所定の性能が得られている。(2)については,高感度の電子ビーム位置モニター(以下BPM)をQ収束磁石の近くに設置し,まず,可視光のHeNeレーザー光をビームラインに導入して,BPMの位置を直線にアラインメントし,つぎに電子ビームを通して,各BPMの中心に来るように,ステアリングコイルまたはQ収束磁石の位置を調整する方式を採用することとした。本年度は,これに必要な次のような要素部品の開発と予備試験を行ってきた。

(1)Cavity-BPM。空洞共振器型の電子ビーム位置モニターであり,分解能1ミクロンメートル以下,絶対原点精度3ミクロンメートル以内(空洞外周から測定した電氣的中心位置のずれ)。

(2)コーズライト材を使用した安定架台。温度係数が 2×10^{-6} 以下という極めて温度に対して安定なセラミック円筒を架台に使用し,上記のCavity-BPMやQ磁石を安定な位置に保持する。

(3)アイリスを用いたレーザーアライメント方式の予備試験。大気中にて約20 m距離を隔て,HeNeレーザー,アイリス,CCDカメラを置き,アイリスの位置を10ミクロンメートルごとにステップ変化させ,CCDカメラにて観測した。その結果正しく10ミクロンステップの移動が観測できており,この方式によるアライメントが実現可能であることが示された。

^{*1} 協力研究員, ^{*2} 客員主管研究員

This laboratory is studying electron beam dynamics in the X-ray FEL machine, which will be built at RIKEN SPring-8 as a future SR source. The SASE-FEL (Self Amplified Spontaneous Emission mode Free Electron Laser) is the only one realistic scheme to realize X-ray laser in Angstrom wavelength. It requires a long undulator section and a low emittance electron beam with high peak current. In order to saturate the FEL within 20 m long undulator at 3 nm wavelength, the emittance should be lower than 2π -mm-mrad with peak current higher than 2 kA.

We are developing the low-emittance electron gun, and C-band main accelerator in the X-ray FEL.

1. Development of low emittance electron gun

In the X-ray FEL, we need to generate low emittance electron beam. The normalized emittance should be lower than 2π -mm-mrad, which is much lower value than that in any existing machine. To make the thermal emittance smaller, a small size of the cathode must be used. We

use single-crystal cathode made by CeB6 with 3 mm in diameter, and applying high voltage of 500 kV in 50 mm gap.

We developed 500 kV gun system, and started operation from Dec. 2003. The operation test results are

(1) After few hours HV processing, voltage on the gun reached to 500 kV. There is no serious HV breakdown.

(2) It generates 1 A beam current stably in daily operation.

(3) Beam emittance measured by double slits was 1.1 π -mm-mrad. This is one of the top values in this field.

(4) After three months operation, no deterioration on the cathode is observed.

(5) Beam current and energy are stable enough for FEL application.

In the next year (2004), we install pre-buncher cavity after the gun. By feeding 238 MHz RF power, we will start beam bunching test, where the bunch length will be 10 psec, and peak current a few 100 A. By monitoring beam emittance using the same method, we will verify the beam quality will match to FEL requirement.

2. C-band high gradient accelerator system development

Hardware R&D on the C-band 5712 MHz RF acceleration system was originally started by T. Shintake in 1996 at KEK for the e^+e^- Linear Collider project. We decided to employ this system in our X-ray FEL. C-band system will generate very high accelerating gradient of 35 MV/m, thus 1 GeV energy will be obtained within 30 m long accelerator. In SCSS group, we are upgrading klystron power supply, such as, 50 kV inverter type HV-capacitor charger, a compact oil-filled pulse modulator.

In the next year (2004), we will start to feed high power RF into accelerating structure, and investigate its high-field performances, and reliability for a long period of operation.

3. Laser alignment system development

In the undulator section, the electron beam trajectory has to follow a very straight line, in order to maintain enough power gain of FEL action. According to the numerical simulation, the tolerance is the order of 10 micrometer in transverse direction.

To guide the beam through the long undulator section, which is 22.5 m long in case of 1 GeV SCSS, we will install beam monitoring station in each gap between undulator segments, that is, 4.5 m steps. To apply focusing on the beam we install Q-magnet, and to control the beam trajectory we move the Q-magnet in transverse direction. In order to monitor the electron beam position we are developing cavity-type beam position monitor (Cavity-BPM), and align BPMs we use HeNe laser. Inserting iris aperture into the Cavity BPM block, and monitor the iris image on CCD camera located downstream. By simply weight averaging of CCD pixel intensity, we found laser spot center. Adjusting BPM position to bring center, and repeat same process for all BPMs, and aligned.

To support these equipments stably, a new ceramic support stand, using cordierite, was also developed. The cordierite has very low thermal expansion ratio, $\sim 2 \times 10^{-6}$ /C, and mechanically rigid, thus suitable to this application.

Research Subjects and Members of Advanced

Electron Beam Physics Laboratory

1. Development of low emittance electron gun
2. Development of C-band high gradient accelerator
3. Development of laser beam alignment system

Head

Dr. Tsumoru SHINTAKE

Members

Dr. Takahiro INAGAKI
Dr. Kazuaki TOGAWA
Mr. Hitoshi BABA*

* Contract Researcher

in collaboration with

Dr. Takashi TANAKA (Coherent Synchrotron Light
Source Physics Lab.)

Visiting Members

Dr. Noritaka KUMAGAI (JASRI SPring-8)
Dr. Hiroshi MATSUMOTO (KEK)
Mr. Futoshi NAKATA (Kobe Univ.)
Mr. Kazuyuki ONOE (ULVAC, Inc.)
Dr. Takayuki SAEKI (Univ. Tokyo)

誌 上 発 表 Publications

[雑誌]

(総 説)

北村英男, 新竹積, 石川哲也: “SPring-8 におけるオンゲス
トローム FEL 開発”, 放射光 **16**, 65–76 (2003).

口 頭 発 表 Oral Presentations

(国際会議等)

Tanaka T., Kitamura H., and Shintake T.: “Consideration
on an alignment tolerance of BPMs for SCSS undulator
line”, 25th Int. Free Electron Laser Conf. and 10th FEL
Users’ Workshop, (JAERI), Tsukuba, Sept. (2003).