

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、電子ビームの運動を理論的に研究し、最適なパラメータ設計を行っている。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) 向けの電子銃、および C バンド加速器の開発を行っている。

1. 低エミッタンス電子銃の開発研究 (新竹, 稲垣, 松本^{*1}; 渡川 (X 線超放射物理学研究室))

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。このため、電子の発生源である電子銃のカソード表面状態の影響、電子の熱運動、そして電子銃内部での空間電荷効果、アノードと磁場レンズの空間的収差などを解析的なモデルにより検討し、さらに数値計算によりこれを検証し、エミッタンスの増大を評価している。これにより、直径 3 mm という小面積のカソードを使用し、高温にて表面が自発的に極めて平坦となる性質を持つ CeB6 単結晶を使用、カソードとアノード間の 5 cm のギャップに 500 kV の高電圧を印加することにより発生する高電界にて加速すれば、エミッタンス 0.5π -mm-mrad という値が得られることが分かった。これをもとに、本年度は 500 kV の電子銃システムの開発を物理科学研究により実施した。来年度にはエミッタンスの測定を実施する予定である。

2. 電子入射器 (バンチャーシステム) の最適化研究 (新竹, Yeremian^{*2}, 松本^{*1}; 渡川 (X 線超放射物理学研究室))

電子銃から得られるビーム電流は、多くとも 3 A 程度であり、X 線 FEL に必要となる数 kA を得るには、電子入射器 (バンチャーシステム) と後続のバンチコンプレッサーにて、バンチ長を数百分の 1 に圧縮する必要がある。しかし、これに伴ってエミッタンスを増大させないために、各機器のパラメータを注意深く最適化する必要があり、当研究室では解析的手法と数値計算によってこれを行っている。それによると、直流ビームからバンチを発生させるためのサブ・ハーモニック・バンチャーの周波数は 500 MHz 以下、引き続きバンチャー加速管は L バンドが最適であることが判明した。現在、この最適化設計にもとづき、具体的に 476 MHz と 1428 MHz の高周波電源、空洞等の詳細設計を行っている。設計された空洞形状、高周波電圧等を数値計算コード Parmella に入力し、電子入射器の出口でのビーム形状を計算した結果、バンチ内の電荷量 1 nC、バンチ長 10 psec に対して、規格化エミッタンス 2π -mm-mrad が得られること

が判明した。これが実現すれば、X 線 FEL のみならず、他の電子ビーム応用にも利益をもたらすものと期待される。

3. バンチコンプレッサーシステムの最適化設計 (新竹; Kim^{*2} (X 線超放射物理学研究室))

アンジュレータに入射する電子ビームのピーク電流値を数 kA に増大させるため、ビームエネルギーが 500 MeV 程度になった時点で、バンチコンプレッサーによりバンチ長を圧縮する。4 個の偏向電磁石により形成されるシュケイン磁場がエネルギーによる軌道の行路差を有することを利用する。前段の加速器にて電子の進行方向のエネルギー傾斜を持たせてシュケインを通過させると、行路差分だけバンチ長が圧縮される。しかしながら電子が磁石で曲がるたびにコヒーレントな軌道放射が発生し、これがビームのエミッタンスを増大させる現象が問題となる。当研究室では、解析的にこの現象を研究するとともに、Elegant Code を用いて数値計算を行っている。その結果、バンチ長の圧縮率が 4 分の 1 程度であれば、エミッタンスの増大が事実上問題とはならないことが判明した。この結果をもとに、アンジュレータ入り口の詳細設計を行っている。

^{*1} 客員主管研究員, ^{*2} 協力研究員

Advanced Electron Beam Physics 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.

To obtain this high quality beam, we start from HV pulse electron gun to generate 3 A beam and compressing bunch length in two stages: the buncher injector system, and the bunch compressor using magnetic chicane. We are studying beam dynamics in this process. We are also

participating hardware R&D on 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. Therefore, we started our research from primitive effect on emittance dilution such as the surface roughness of cathode material, space charge effect between cathode and anode, geometric aberration in magnetic focusing lens. After this study, we found that it is necessary to use a single-crystal cathode made by CeB6 with 3 mm in diameter, and applying high voltage of 500 kV in 50 mm gap. The estimated emittance is 0.5π -mm-mrad at the exit of anode electrode of the gun.

2. Optimization of electron buncher injector system

In the buncher injector, the electron beam from the gun is velocity modulated. We analyzed emittance growth due to RF field and chose the RF frequency at 476 MHz in sub-harmonic buncher and L-band (1428 MHz) in buncher accelerator. In order to estimate emittance dilution due to space charge we simulated beam trajectory using Parmella code and optimized the operation parameter. It was found that the beam emittance of 2π -mm-mrad could be obtained for 1 nC bunch charge, 10 psec bunch length, 20 MeV beam energy at the exit of injector system.

3. Optimization of Chicane Bunch Compressor

At the beam energy of 500 MeV, the bunch length will be shortened four times in the magnetic chicane bunch-compressor. On big problem here is the emittance dilution due to the coherent synchrotron radiation (CSR). We studied analytically and numerically this effect using Elegant particle tracking code. By optimizing the chicane magnet configuration, we found the emittance dilution will be small enough if we limit the compression factor at four.

Research Subject and Members of Advanced Electron Beam Physics Laboratory

1. Development of low emittance electron injector

2. Study of very short electron bunch generation
3. Theoretical investigation of beam dynamics in electron injector

Head

Dr. Tsumoru SHINTAKE

Members

Dr. Takahiro INAGAKI

in collaboration with

Dr. Kazuaki TOGAWA (Coherent Synchrotron Light Source Physics Lab.)

Dr. Yujong KIM (Coherent Synchrotron Light Source Physics Lab.)

Visiting Members

Prof. Hiroshi MATSUMOTO (KEK)

Prof. Shigeru TAKEDA (KEK)

Dr. Anahid Dian YEREMIAN (SLAC, USA)

誌 上 発 表 Publications

[雑誌]

(原著論文) *印は査読制度がある論文

Tanaka T., Kitamura H., and Shintake T.: "Misalignment effects of segmented undulator in self-amplified spontaneous emission", Phys. Rev. Spec. Top.: Accel. Beams **5**, 40701-1-40701-7 (2002). *

口 頭 発 表 Oral Presentations

(国際会議等)

Kamiya N. and Shen J.: "Crystal structure analysis of photosystem II from *Synechococcus bulcanus* at BL41XU of SPring-8", 19th Congr. and General Assembly of the Int. Union of Crystallography (IUCr XIX), Geneva, Switzerland, Aug. (2002).