

[P7-03]

Improvement and operation of the storage ring NIJI-IV for an oscillation of free electron laser in the VUV region

N. Sei, K. Yamada, T. Yamazaki*, T. Mikado, H. Ohgaki, T. Ohdaira,
R. Suzuki, H. Toyokawa, S. Sugiyama, M. Chiwaki, M. Kawai**, M. Yokoyama**

Quantum Radiation Division, Electrotechnical Laboratory
1-1-4 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568, JAPAN

*Institute of Advanced Energy Kyoto University

Gokasho, Uji-shi Kyoto 611, JAPAN

** Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

118 Futatsuzuka, Noda, Chiba 278, JAPAN

We study to shorten wavelength of free electron lasers with the storage ring NIJI-IV which is injected the electron beam by the linac TELL. The lasing at the wavelength of 212 nm, which is the shortest record for FELs, was achieved in October 1998. We report the recent improvement of the RF system in the NIJI-IV and the operation of the NIJI-IV in this article.

真空紫外自由電子レーザー発振を目指した蓄積リング NIJI-IV の改造と運転

1 はじめに

電子技術総合研究所では、リニアック TELL を入射器とした自由電子レーザー(FEL)専用電子蓄積リング NIJI-IV を用いて、FEL の短波長化の研究を行っている。昨年の研究会で報告したように、分散関数の大きい短直線部に 6 極-4 極-6 極(SQS)磁石を挿入することでクロマチシティを完全に補正し、ヘッドテイル不安定性を十分に抑制したことで、1998 年 4 月には波長 228nm での FEL 発振に成功した [1]。さらに、共振器ミラーとして $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ の誘電体多層膜ミラーを使用したことで、10 月には FEL として最短波長記録である 212nm での発振にも成功した [2]。だが波長 200nm での FEL 利得は約 2% であり、真空紫外域で FEL 発振を行うためには、もう少し利得を増大させる必要があった。

そのため、新たに RF キャビティを製作・設置し 1999 年 1 月より蓄積リングへの入射を開始した。新しい RF キャビティには、周波数調整用のプランジヤーが 2 つあり電極の一方が可動である。また、温調能力を高めたことで、今後予定されている RF 電源の更新により RF 入力を現行の 2kW から 10kW まで増大させ、電子ビームのバンチ長を短くできることを期待している。さらに、より安定で高強度の FEL が得られるように、蓄積リングへの入射・蓄積

条件の変更も検討している。本報告では、遠紫外 FEL 発振から得られた知見、及び真空紫外 FEL 発振を目指した新 RF キャビティの特性と蓄積リングのオペレーションについて述べる。

2 波長 215nm 付近の FEL 発振

1997 年に蓄積リングの全ての短直線部に SQS 磁石を設置したことにより、水平・垂直の両方のクロマチシティを補正可能になった。このことにより、シングルバンチ運転時に 10mA 程度で発現していた電子バンチのヘッドテイル不安定性は十分に抑制され、30mA を越すバンチ電流を得られるようになった。しかもバンチ間相互作用によるカップルドバンチ不安定性も生じなかったため、バンチ内電子のピーク密度は $6 \times 10^{16} \text{m}^{-3}$ 以上となり、SQS 磁石挿入前の 5 倍以上になった。このために、300nm 及び 240nm 付近の波長で FEL 発振に成功して、NIJI-IV FEL 装置の発振最短波長は 349nm から一気に 228nm まで短くなった [3]。

しかし、波長 240nm 付近の FEL 実験で使用されていた共振器ミラーの材質 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ は、220nm 付近で強い光吸収損失を生じるために、それ以下の波長で FEL 発振させることは困難であった。これに対し $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ の誘電体多層膜ミラー

は、200nm 以下でも高い反射率を得ることができる。当所で使用したミラーのアンジュレータ光照射前の共振器損失は、波長 215nm で約 0.5%であった。一方で電子密度から期待されるこの波長の FEL 利得は、300~240nm の FEL 実験と同じ電子エネルギー(リニアックからの入射エネルギーと等しく約 310MeV)で 2%以上あり、十分に発振可能であった。真空紫外域に近い波長のため共振パターンの調整等に困難があったが、1998 年 10 月 8 日に 215nm 付近での FEL 発振に成功した [2]。

発振波長は、光クライストロンのギャップを調整することで 215~212nm まで変化した。この 212nm という波長は現在のところ FEL の最短波長記録である。最短波長 FEL の発振スペクトルを図 1 に示す。発振持続時間は約 20 分余りで、電子ビームの閾電流値は 8.0mA であった。11mA 時では、共振器長を 40 μ m までずらしても発振が持続した。発振の横モードは TEM₀₀ で、これ以外のモードでの発振は観測されなかった。

当時の電子ビームの状態でも波長 200nm において最大約 2%の FEL 利得は得られるが、真空紫外域で安定な FEL 発振を得るためには不十分であった。そのために、より高い FEL 利得が可能となる蓄積リングの改造-RF キャビティの更新-が行われた。

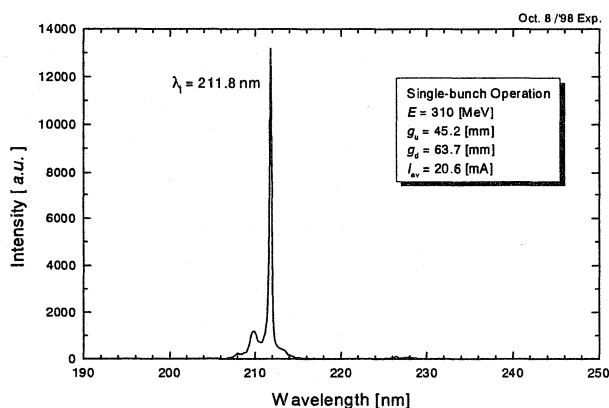


図 1 世界最短波長の FEL スペクトル

3 新 RF キャビティの特性

以前使用していた RF キャビティには胴体内面に放電痕とみられる陥没が多数生じており、キャビティへの入力も放電のために 1.3~1.4kW が限界であった。シンクロトロン振動数も 50kHz 以下のため、

自然バンチ長は 21mm 程度であった。そこで、10kW の入力が可能であり自然バンチ長を短くできること、高次モードに対応可能であることを目的として、RF キャビティを製作した。共振周波数や大きさの制約から、以前のキャビティと同様にリエントラント型とし、共振周波数も 16 バンチ蓄積される 162.2MHz とした。しかし、電子ビームローディングによる共振周波数変化を調整するための、無酸素銅製のプランジャーを増やして二つにした。プランジャーの位置によって加速空洞内につた高次モードは変化し、カップルドバンチ不安定性の誘因になるが、プランジャーを増やすことで高次モードを変化できるのである。さらにプランジャーの位置の自由度を増やすために、電極の一方を ± 5 mm の範囲で可動にした。また、10kW 入力が可能のように、空洞胴体を二重構造にしてその内部に温調した水を流し、RF キャビティの温度調整能力を向上した。新 RF キャビティの概略を図 2 に示す。

RF キャビティの Q 値測定には、一般によく用いられている transmission method を使用した。その結果、無負荷の Q 値は ~ 5000 と低い(旧 RF キャビティは 6500)ことがわかった。プランジャー数が増えたこと、可動電極になったことが影響していると考えられる。ピーズ摂動法によるシャントインピーダンス測定では、シャントインピーダンス R_{sh} が約 1.0M Ω であった。この値は 2kW の RF 入力でも 50kHz 以上のシンクロトロン振動数を得るのに十分な値である。

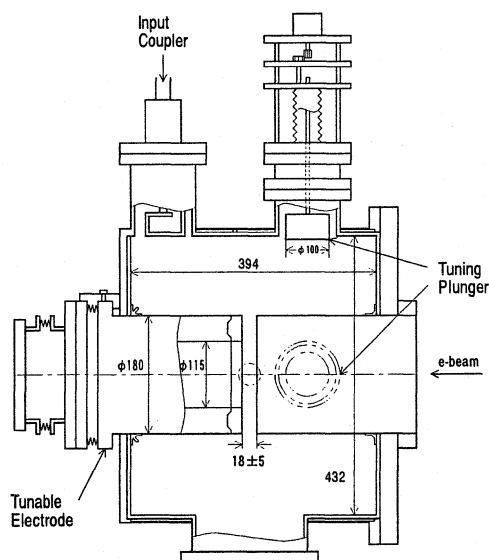


図 2 新 RF キャビティの概略

新 RF キャビティは 1999 年 1 月に設置が完了し、現在入射・蓄積試験が行われている。シンクロトロン振動数観測によるシャントインピーダンスの測定を行い、 $R_{sh} \sim 0.7 M\Omega$ という結果を得た。また、プランジャーの位置によるシャントインピーダンスの変化も観測された。今後、蓄積電流を増加させてさらに電子ビームの特性を観測する予定である。

4 真空紫外 FEL 発振のための入射・蓄積

波長 350nm から 215nm まで FEL 発振の短波長化においては、電子エネルギーを 310MeV に固定し、光クライストロンのギャップ間隔によって発振波長を調整していた。310MeV というのはリニアックからの通常の入射エネルギーであり、マルチバンチで入射してから FEL 実験の設定までにエネルギーの調整が含まれないため、より多くのビーム電流で発振実験を開始できる利点がある。しかし、光クライストロンの K 値を小さくするため共振光が微弱になり、共振パターンの観測などに支障をきたしている。蓄積電子エネルギーを増大すれば飛躍的に光強度が増加するが、現在では主電磁石の制御器が分割されているという困難さもある。そこで、リニアックの加速エネルギーを上昇させ、340MeV で入射し FEL 実験に使用することを検討している。この入射エネルギーは蓄積リング NIJI-IV の輸送系偏向電磁石電源の制限に由来している。TELL の加速管 9~20 に対するクライストロンの印加電圧を通常入射よりも高め、マクロパルス幅を通常 $1\mu s$ から 800ns 程度に変更することで 340MeV 入射が行える。加速管 1~8 に対して変更を加えないのは、陽電子施設や蓄積リング NIJI-II への入射に対し、調整変更箇所を最小限にするためである。340MeV 電子エネルギー運転時における、蓄積リングの主な電子ビームパラメータ等を表 1 に記す。微小電流に対する電子バンチの電子密度はエネルギーを上げることで減少するが、実際にはビーム不安定性等が生じるので、エネルギーを上げたことによる FEL 利得に対する影響は小さいと考えられる。

また、蓄積リングへの入射において、カップルドバンチ不安定性によるビームサイズの増大が蓄積電流を制限しているのであれば、シングルバンチ入射も有効な手段になるだろう。この入射は、

通常使用している $1\mu s$ パルサーの代わりに 1ns 幅の短パルサーで電子銃を駆動する。1995 年に蓄積リングへ入射試験が行われシングルバンチで 2mA 蓄積した [4]。しかし当時ヘッドテイル不安定性があったことと、リニアックに 1ns 幅の電子パルスを観測する手段が無かったため、有効な入射ではなかった。観測系を充実することが課題である。

表 1 電子ビーム等の主パラメータ

電子エネルギー [MeV]	310	340
エミッタンス [nm rad]	50.3	60.5
バンチ長 [mm]	21	25
K 値	1.44	1.70
全放射エネルギー [kW/A]	0.70	1.01

5 まとめ

FEL 専用電子蓄積リング NIJI-IV を使い、FEL で最短波長である 212nm で発振に成功した。さらに短波長化を進め真空紫外域で FEL 発振するために、RF キャビティを更新した。新 RF キャビティは、高次モード調整のために 2 つのプランジャーと可動電極を持っている。さらに、10kW の入力が可能であり、今秋の RF 電源の更新によりバンチ長を短くできることが期待されている。また、蓄積電子エネルギーを上げて FEL 強度を高めるため、リニアックからの高エネルギー (340 MeV) 入射も計画されている。これらの改善により、真空紫外域での FEL 発振を実現させたい。

REFERENCES

- [1] N. Sei et al., Proc. 23rd Linear Accelerator Meeting in Jpn., (1998) 328.
- [2] K. Yamada et al., Proc. ECOMAP-98, Kyoto, (1998) 277.
- [3] N. Sei et al., Nucl. Instr. and Meth. A (1999) in press.
- [4] M. Yokoyama et al., Nucl. Instr. and Meth. A375 (1996) 53. ; M. Yokoyama et al., Proc. 20th Linear Accelerator Meeting in Jpn., (1995) 16.