

Research and Development of Microwave Undulator

Y. Furuta^{1,A)}, H. Matsumoto^{B)}, M. Yoshida^{B)}, T. Imai^{C)}, J. Chiba^{A)}

^{A)} Faculty of Science and Technology, Tokyo University of science
2641 Yamazaki, Noda, Chiba, 278-8510

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{C)} FEL-TUS:IR-FEL Research Center of Tokyo University of Science
2641 Yamazaki, Noda, Chiba, 278-8510

Abstract

We have researched and developed a microwave undulator. An undulator is a device which emit light by passing a charged particle. A permanent magnet undulator is usually used at a free electron laser (FEL) and a storage ring. However a microwave undulator has several advantages those include no radiation degradation. We work toward the first FEL oscillation with a microwave undulator. We present its theory of microwave undulator and microwave simulation and its characteristics measured by a low power test.

マイクロ波アンジュレータの開発研究

1. はじめに

アンジュレータには永久磁石やマイクロ波を用いたものがある。自由電子レーザー(FEL)や放射光リングでは、一般的に永久磁石アンジュレータが用いられているが、放射線損傷による性能劣化や製作が困難であるなどの問題点がある。一方、マイクロ波を用いたアンジュレータには以下の利点が考えられる。(1)線形加速器と光共振器を組み合わせたFELに導入することにより、RF電子銃、加速管を含めた主要構成要素をマイクロ波駆動する統合的なシステムが実現する。(2)パルス毎にフィードフォワードをかけることでFEL光の安定性が向上する。表1に永久磁石アンジュレータとマイクロ波アンジュレータの特徴の比較を示す。

表1：永久磁石とマイクロ波を用いたアンジュレータの特徴

種類	永久磁石型	マイクロ波型
電磁場制御	磁石間距離	マイクロ波
製作(加工)	複雑	容易
構造体機械強度	大	小
放射線劣化	ある	ない
フィードフォワード	難	可能

これまでにマイクロ波アンジュレータによる放射光の観測をした例はあるが^{1,2)}、本研究ではマイクロ波アンジュレータを用いた初のFEL発振を目指している。今回製作するアンジュレータは、東京理科大

学赤外自由電子レーザー研究センター(FEL-TUS)のFEL³⁾に導入することを想定し設計した。FEL-TUSには永久磁石アンジュレータを用いた中赤外FEL(MIR-FEL)と遠赤外FEL(FIR-FEL)があり、MIR-FELの発振に成功している。表2に各FELのパラメータを示す⁴⁾。

表2：FEL-TUSにある各FELのパラメータ

FELパラメータ			
	MIR-FEL	FIR-FEL	[unit]
加速器			
高周波周波数	2856	2856	[MHz]
最大エネルギー	40	10	[MeV]
FEL発振波長	5-16	300-1000	[μ m]
アンジュレータ			
全長	1.38	1.75	[m]
磁場周期	32	70	[mm]
周期数	43	25	
Kパラメータ	1.4-2.4	2.0-3.4	
最大磁場強度	0.83	0.52	[T]

2. マイクロ波アンジュレータの設計

マイクロ波アンジュレータの設計では、全体構造と結合窓の形状を決める必要がある。

全体構造については、FEL-TUSの既存の高周波源を用いる予定であるため、共振周波数は2856MHz(S-band)とし、進行波型より構造が単純である定在波型を採用した。共振モードは、電子を蛇行運動させることが出来るTE_{10,n}モードを用いる。また、強い電磁場を得るよう、上下にリッジと呼ば

¹ E-mail: j6205622@ed.noda.tus.ac.jp

れる突起を取り付けた。図1にマイクロ波アンジュレータのX-Y断面を示す。

アンジュレータの全長Lは管内波長 λ_g の半整数倍でなければならない。その為、管内波長 λ_g を求めるためにマイクロ波シミュレーション（FDTD法）を用いた。全長Lが長いほど磁場の周期数が増える為、アンジュレータで発生する放射光の強度は大きくなるが、今回は1m以下で設計した。その理由はFEL-TUSの設置スペースおよび加工制限のためである。

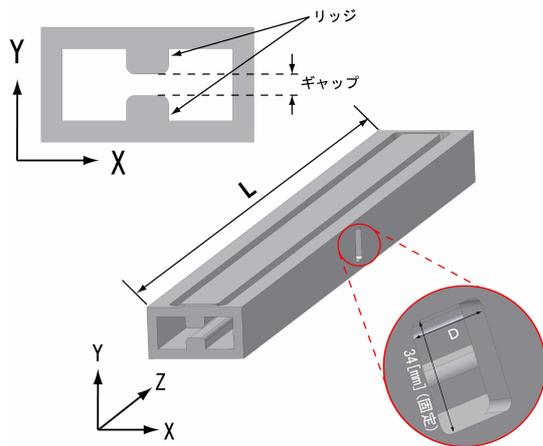


図1：マイクロ波アンジュレータの3Dモデル

結合窓の形状については、最適なFilling timeとなる結合度 β を実現できるように決定する。その際、縦方向の長さは導波管の径と同一とし、横方向の長さDを最適化することにした（図1）。

まず、電圧99%Filling timeと結合度の関係をシミュレーションによって求めた（図2）。FEL-TUSのFEL装置の電子銃は定在波型であり、電子銃とマイクロ波アンジュレータのRF源は同一のものを使用するためFilling timeも同程度にする必要がある。電子銃のFilling timeが1 μ secであることから、図2より、結合度 β は3.5が適当であると求めた。

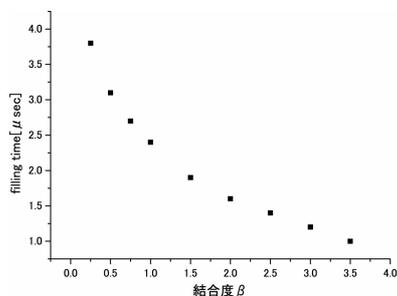


図2：結合度 β とFilling timeの関係

次に結合度 β と窓の横方向の長さDの関係をシミュレーションによって求め（図3）、結合度 β が3.5となる30.5mmをDとした。

以上から決定したマイクロ波アンジュレータのパラメータを表3に、またFIR-FELに導入し13MWのマイクロ波を入力した場合のパラメータ表4に示す。

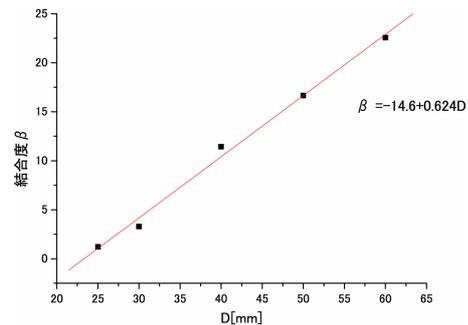


図3：窓の大きさと結合度 β の関係

表3：シミュレーションによって求めたマイクロ波アンジュレータのパラメータ

周波数	2856	[MHz]
形状	ダブルリッジ導波管	
共振モード	TE _{10,n}	
管内波長 λ_g	117.4	[mm]
全長	997.9(=17/2 λ_g)	[mm]
カットオフ周波数	1275.5	[MHz]
Filling time	1	[μ sec]
結合度 β	3.5	
Q ₀	9300	
結合窓(縦×横)	30.5×34	[mm ²]

表4：FIR-FELに導入し13MWのマイクロ波を入力した場合のパラメータ

最大表面電界	100	[MV/m]
Kパラメータ	1.6	
磁場強度	0.63	[T]
発振波長(E _c :10MeV)	164	[μ m]

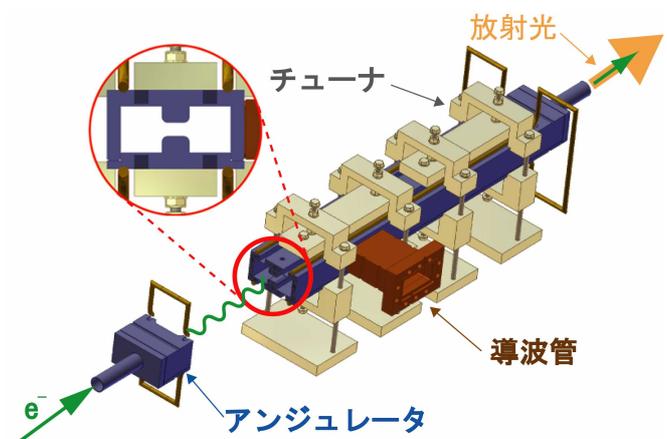


図4：チューナなども含めた組図

2.1 チューナ

シミュレーションなどを用いて全体構造を設計した。しかし今回製作するマイクロ波アンジュレータはQ値が大きいので、全長Lは10 μ mオーダーの工作精度が要求される。そこでチューナを用いて共振周波数を調節することが出来るようにした。チューナを用いてギャップ間距離を0.1mm変化させることにより、共振周波数を12MHz程度変化させることが出来る。チューナ、冷却パイプなども含めた組図は図4となる。

3. 低電力測定

上記のシミュレーション結果を用いてマイクロ波アンジュレータを製作した。図5は製作したマイクロ波アンジュレータ本体、エンドプレート、導波管を仮組みした写真である。

低電力測定はネットワークアナライザを用いて行い、マイクロ波アンジュレータの共振周波数と結合度 β を測定する。製作したマイクロ波アンジュレータの設計値からのずれは、共振周波数については全長Lで、結合度 β については窓の横方向の長さDで調整する。その点を考慮し、全長は少し長めに、結合窓は少し小さめに製作した。測定結果は表5に示す。

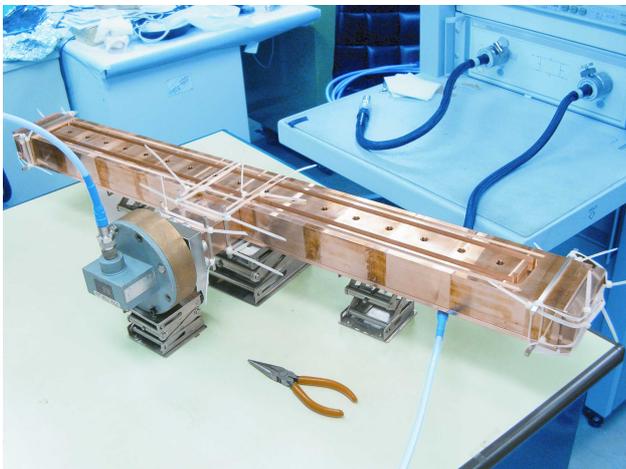


図5：製作したマイクロ波アンジュレータ

表5：低電力測定結果

共振周波数	2804.2	[MHz]
カットオフ周波数	1166.8	[MHz]
Q_L	5608.4	
Q_0	7010.5	
結合度	0.25	

3.1 共振周波数の測定と調整加工

今回の測定は空気中で行ったため、共振周波数が真空中にくらべ0.03%低下する。そのため、共振周波数を2855.1MHzとなるように調節する。表5の測

定結果より、製作後のアンジュレータの共振周波数は2804.2MHzとなっている。そのため、設計共振周波数2855.1MHzとの50.9MHzのずれを補正するために削る長さは、カットオフ周波数を用いると、21.6mmと見積もられる。そのとき全長Lは978.4mmをターゲットに再加工していく。

3.2 結合度 β の測定と調整加工

表5の測定結果より、結合度 β は0.25となっている。そのため、結合度 $\beta_{3.5}$ とのずれを補正する為に削る長さは、結合度3.5付近での $dD/d\beta$

$$\frac{d\beta}{dD} = 0.4138[1/\text{mm}]$$

を用いて7.9mmと見積もられる。そのとき窓の横方向の長さDは34.9mmをターゲットに再加工していく。

以上のように、低電力測定の結果を踏まえ、全長978.4mm、窓34.9mmに再加工、調整を行う。

4. まとめ

FELでの発振を目指し、マイクロ波アンジュレータの開発研究を行っている。FEL-TUSのIR-FELに導入することを想定し、S-band定在波型マイクロ波型アンジュレータの設計を行い製作した。特にアンジュレータ全長や結合窓の形状については、詳細なマイクロ波シミュレーションを行った。低電力高周波測定の結果を踏まえ、修正加工し、ろう付けして本組みする。さらに、高電力によるエージングを行う予定である。

5. 謝辞

本研究は、高エネルギー加速器研究機構による「加速器科学支援事業における大学等連携支援事業」の一環として行われている。関係者の皆様に心より御礼申し上げます。

参考文献

- [1] T. Shintake, et al., "Microwave Undulator", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 22 No. 10 (1982) L601-L603.
- [2] T. Shintake, et al., "Development Microwave Undulator", Jpn. J. Appl. Phys., 22 (1983) 844-851.
- [3] 今井貴之, 小城吉寛 日本加速器学会会誌 Vol.3, No.1, 2006 (51-56)
- [4] 黒田晴雄, "赤外自由電子レーザーの高性能化とそれを用いた光科学", 科学研究費補助金(学術創成研究)最終報告書, 課題番号 11NP0101(2004).