

Development of W-band electromagnetic wave undulator

Hiroiyuki Toyokawa^{1A)}, Ryunosuke Kuroda^{A)}, Hideki Ohgaki^{B)}

^{A)} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

1-1-1 Umezono, Tsukuba, IBARAKI 3058568

^{B)} Institute of Advanced energy, Kyoto University, Uji, Kyoto 6110011

Abstract

An electromagnetic-wave undulator using a quasi-optical resonator operated in the higher order TE mode is proposed for the X-ray undulator using a compact electron accelerator. Mode propagation was analysed with MAFIA, and the design parameters for W-band electromagnetic wave undulator was presented.

Wバンド電磁波アンジュレータの開発

1. はじめに

加速器技術を産業や医療へ応用し、作業現場において計測・診断、治療ツールとして有効に活用するためには、装置の小型化が必須である。筆者らは加速器技術を産業技術に応用するモデルの一つとして、小型電子加速器を用いたコンパクト高輝度光源について研究している。コンパクト光源開発においては、加速器の小型化と共に光源部を小型化することが必要である。電子から光への変換については、アンジュレータを始め、金属ターゲット、回折格子、フォトニック素子、薄膜など様々な方法が考えられる。アンジュレータで最もコンパクトなものは、周期長10 mm程度の真空封止型アンジュレータであり、SPRING-8などで用いられている。電磁波アンジュレータは、短周期アンジュレータとして利用できる。

2. 電磁波アンジュレータ

1982年にShintakeらによって電磁波アンジュレータの実証実験が行われた。Sバンドリッジ導波管に100 - 200 MeV電子を通して、可視域でアンジュレータ光を観測した[1,2]。Kawamuraらは高強度CO₂レーザーを10 GW/cm²に集光し、0.65 - 0.85 MeVの電子を使って500 nm程度の可視域でのレーザーアンジュレータ光を観測した[3]。1999年にはKangらによって、ユニークな形式の電磁波アンジュレータの提案がなされた[4,5]。この手法については後述する。

我々は自由空間での波長3.16 mmのWバンド(95 GHz)において電磁波アンジュレータ実現の可能性について検討した。WバンドはRFの特徴とレーザーの特徴を併せ持つ。RFバンド電磁波の呼称、波長、周波数を表1にまとめた。これらについてはさらに細かい分類や、やや異なる波長域での分類法などもある。

表1 RFバンドの呼称

バンド呼称	波長(cm)	周波数(GHz)
UHF	100 - 10	0.3 - 3
L	30 - 15	1 - 2
S	15 - 7.5	2 - 4
C	7.5 - 3.7	4 - 8.2
X	3.7 - 2.4	8.2 - 12.4
Ku	2.4 - 1.7	12.4 - 18
K	1.7 - 1.1	18 - 26.5
Ka	1.1 - 0.75	26.5 - 40
Q	0.9 - 0.6	33 - 50
U	0.75 - 0.5	40 - 60
V	0.6 - 0.4	50 - 75
E	0.5 - 0.3	60 - 90
W	0.4 - 0.27	75 - 110
F	0.3 - 0.21	90 - 140
D	0.27 - 0.18	110 - 170
G	0.21 - 0.14	140 - 220
H	0.18 - 0.12	170 - 260
J	0.14 - 0.13	220 - 235

2.1 電磁波アンジュレータの選択基準

表2に、電磁波アンジュレータとして様々な電子と電磁波源との組み合わせについて検討した結果を示す。主だった利用例として、13.5 nmのEUVリソグラフィ、33 keVのアンジオグラフィを挙げた。応用例によって、電磁波の波長や電子エネルギーとして多くのモデルが考えられる。

表2 電磁波アンジュレータ、電子と電磁波のコンプトン散乱などを用いたX線源

X-ray [keV]	e- [MeV]	EMW [μ m]	Source
3.6	760	3160	W-band EIK
0.54	300	3160	W-band EIK
0.06 (21 nm)	100	3160	W-band EIK

¹ E-mail: h.toyokawa@aist.go.jp

0.09 (EUV, 13.5 nm)	100 50 24 2.3	2070 515 120 1.064	Gyrottron 0.58 [THz] Alcohol laser IR (YAG) laser
33.17 (Angiography)	500 100 43.1	143 5.7 1.064	Alcohol laser FIR laser (FEL etc) IR (YAG) laser

WバンドはSバンドの30倍の高調波であり、自由空間中の波長は3 mm程度である。電磁波アンジュレータとしてのWバンドの選択理由を下記にまとめた。

- レーザーと比較してアライメント精度が緩やか。
- レーザーの空間的なハンドリングの良さとマイクロ波の従来技術が使える。
- 導波管等が規格品のため、システム構築が比較的簡単。
- CPIカナダ社からW-band Extended Interaction Klystron (EIK)が数千万円程度で市販。出力はCW-数100 W、あるいはピーク出力数kW程度。
- 100 GHz帯超ではジャイロトロン(数億円規模)。

2.2 電磁波アンジュレータデザイン

電磁波を蓄積リング中へ導入し、電子と相互作用させる方法は、導波管モードと共振器モードに大別される。前者はマイクロ波技術からのスケールダウンであるが、Wバンド導波管規格はWR-10(内寸横2.54 mm、高さ1.27 mm)であるため、このままでは電子ビームを通すことが困難である。また、電子蓄積リングに設置する場合、入射軌道を妨げるため、水平方向には真空チャンバーと同じくらいの寸法を確保する必要がある。TERASの場合、これは50 mm程度となるため、かなりの高次モード導波管となってしまう。

後者については、無酸素銅などを反射鏡に用いた長軸Fabry-Perot共振器を構築することで、蓄積リングへの設置に関する問題をクリアできる。この場合、共振器ミラーにアウトカップリング孔を開けX線を取り出す。発生点より50 cm位置に直径1 mmの孔を開けた場合、孔から漏れ出てくるアンジュレータ光の、全発生光子数に対する割合は表3のようになる。

表3 開口部1 mm(半角で1 mrad)を通した場合のWバンド電磁波アンジュレータの収量とエネルギー。

Energy [MeV]	Yield [%]	Top energy [keV]
800	67	3.8
500	49	1.5
100	5.3	0.060
50	1.4	0.015

電子エネルギーとして数10 MeV程度を最終的なイメージとした場合、アウトカップリング孔は十分大

きくなければいけないが、電磁波の波長程度まで大きくすることはできないため、共振器によるアンジュレータ電磁場形成はやや困難となる。

マイクロ波導波管の簡易性とWバンドの光学的特性を利用し、発生したX線のアウトカップリングを効率よく行う手法として、準光学共振器(quasi-optical resonator)を用いる[4 - 6]。

図1にquasi-optical resonatorの概略を示す。二枚の円筒ミラーを向かい合わせた合わせ鏡のような導波管であり、図中ではz軸を電子の軸に反平行に合せている。このような構成でtransverse方向の収束はFabry-Perot共振器と同様に自由空間モードで行い、longitudinal方向は導波管を挿入できる寸法にするため、高次の導波管モードとする。この場合、電子軌道とquasi-optical resonator軸上に横方向の周期電磁場が形成される TE_m モード($m = \text{odd}$, $n = 0$)を選択する。このデザインでは横方向を完全に開放できるため、蓄積リングの入射軌道を妨げることはない。また、 $n = 0$ の高次モードはアンジュレータ磁場として不適切なものがほとんどであるが、これらは水平方向の開口部によってすぐに減衰するため、モード選択性を有する。

3. アンジュレータの見積もり

三次元電磁場解析コードMAFIAを用いて、数種類のモデルについて電磁場解析を行った。図2は曲版間隔、曲率を色々変えた場合にMAFIAによって計算された最大電界強度である。他計算結果を含め、諸条件を最適化する寸法について検討した結果、曲版間隔 $d = 20$ mm、曲率 $r = 18$ mm、 TE_{70} モードで電磁波アンジュレータ設計を行うことにした。図3は上記寸法の電界強度分布のcontour plotである。これらの結果をもとに、アンジュレータ光のパラメータを計算し、表3にまとめた。アンジュレータスペクトルとTERASの偏向電磁石からの放射光スペクトルを図4に示す。ピーク位置の3.4 keVの強度に関しては、放射光より若干低い、線幅が狭いため十分に観測可能であると予想される。

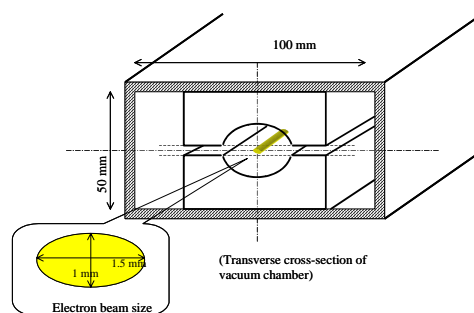


図1 quasi-optical resonator

3. おわりに

Wバンド電磁波アンジュレータを用いたコンパクト光源について検討し、蓄積リングTERASに挿入した場合のアンジュレータ光の見積もりを行った。そ

の結果、3.4 keV軟X線が 10^{11} 乗のオーダーで発生することがわかった。今後は、必要な高次モードを励起するための入力カプラーの設計について検討し、テストベンチでの動作確認を行う予定である。

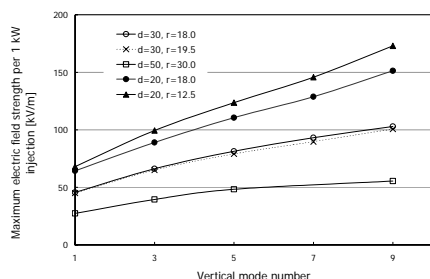


図2 TE_{mn}モードにおける、モード次数m vs.入力1 kW時の最大電界強度のグラフ。

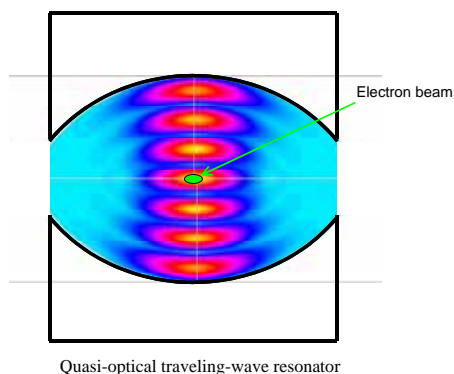


図3 TE₇₀モードの電界強度分布。曲板間隔d = 20 mm、曲率r = 18 mm。

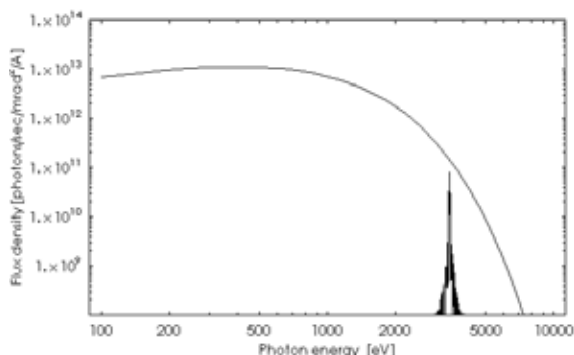


図4 Teras偏向電磁石SR光スペクトルとWバンド電磁波アンジュレータスペクトル。

謝辞

川崎重工業の横山稔、および中山章弘、両氏におきましてはMAFIAの計算についてご尽力くださいましたことを感謝いたします。

参考文献

- [1] T. Shintake, K. Huke, J. Tanaka, I. Sato, and I. Kumabe, Jpn. J. Appl. Phys. 21[10](1982)L601-L603.
- [2] T. Shintake, K. Huke, J. Tanaka, I. Sato, and I. Kumabe, Jpn. J. Appl. Phys. 22[5](1983)844-851.
- [3] Y. Kawamura, D. Li, S. Rushin, T. Tanabe, K. Toyoda, Nucl. Instrum. and Meth. A445(2000)241-246.
- [4] Y. W. kang, R. L. Kustom, P. J. Matthews, and A. Nassiri, EPAC 1994 Proceedings, pp.657-659, 1994.
- [5] Y. kang, J. Song, and R. Kustom, 1999 PAC Proceedings, pp.168-170, 1999.
- [6] T. Nakahara, N. Kuramochi, IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques MTT-15[2](1967)66-71.

表3 電子蓄積リングTERASに95 GHz Wバンド電磁波アンジュレータを設置した場合の見積もり

EMW	95 [GHz] W-band, 1 [kW] peak, (pulse width 0.1 - 50 [μ sec], duty cycle 1%)
Waveguide mode	TE ₇₀ mode
Electron energy	760 [MeV]
Interaction region	80 [cm]
Equivalent undulator pitch	1.6 [mm]
Peak electric field	1.29×10^5 [V/m]
Effective magnetic field density	4.29×10^{-4} [T]
K-value	6.41×10^{-5}
Undulator light wavelength	3.62×10^{-10} [m] (3.43 [keV])
Line width (/)	0.2 %
Peak photon flux density	1.03×10^{11} [photons/sec/mrad ² /A]
Synchrotron radiation	1.55×10^{11} [photons/sec/mrad ² /A @ 3.43 keV]
Attenuation,	0.066 dB/m for TE ₇₀ (0.988 for 80 cm)