Development of W-band electromagnetic wave undulator

Hiroyuki 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
С	7.5 – 3.7	4 - 8.2
Х	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
Н	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 [µm]	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	100	2070	Gyrotron
(EUV,	50	515	0.58 [THz]
13.5 nm)	24	120	Alcohol laser
	2.3	1.064	IR (YAG) laser
33.17	500	143	Alcohol laser
(Angiography)	100	5.7	FIR laser (FEL etc)
	43.1	1.064	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	d%] Top	energy [keV]
800	67	3	3.8
500	49	1	.5
100	5.3	C).060
50	1.4	C	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(quasioptical 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 合わせている。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TEmモード(m = 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 板間隔d = 20 mm、曲率r = 18 mm、TE₇₀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が、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10¹¹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

- 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 GHzW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	$1.29 \ge 10^5 [V/m]$
Effective magnetic field density	4.29 x 10 ⁻⁴ [T]
K-value	6.41 x 10 ⁻⁵
Undulator light wavelength	3.62 x 10 ⁻¹⁰ [m] (3.43 [keV])
Line width (/)	0.2 %
Peak photon flux density	$1.03 \ge 10^{11}$ [photons/sec/mrad ² /A]
Synchrotron radiation	1.55 x 10 ¹¹ [photons/sec/mrad ² /A @ 3.43 keV]
Attenuation,	0.066 dB/m for TE ₇₀ (0.988 for 80 cm)