

MICROWAVE UNDULATOR

T. Shintake, K. Huke\*,  
J. Tanaka\*, I. Sato\* and I. Kumabe

Department of Nuclear Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University

\* National Laboratory for High Energy Physics

ABSTRACT

An undulator, which uses a microwave field instead of a static, periodic magnetic field, has been operated successfully at the Photon Factory electron linac. When 300 kW of S-band microwave power is fed into the undulator cavity, the undulator has a period of 5.5 cm, with an equivalent magnetic field of 0.45 kG and K-parameter of 0.24. At a beam energy of 100 ~ 150 MeV, quasi-monochromatic synchrotron radiation in the visible region was observed and the spectrum was measured.

1. 序

一定の周期構造を持った電磁界の中に相対論的電子ビームを通すと、電子は横方向に周期的な加速を受けサイン波運動をし、電子の進行方向にシンクロトロン放射光を発生する。これをアンチデュレータであり干渉効果のために、準単色、高輝度の放射光が得られる。

一般にアンチデュレータは、永久磁石や電磁石を用いて製作されているが、これら静磁場のかわりにマイクロ波などの時間的に変化する電磁界を用いてもアンチデュレータが実現できるはずである。これがマイクロ波アンチデュレータであり、可変波長や短波長またパルスアンチデュレータとして将来の可能性が大きい。我々は、マイクロ波アンチデュレータが実際にうまく動作することと技術的な問題を調べるために、基本的な機能のみを持つマイクロ波空洞を製作し、高エネルギー研究所放射光電子ライナックにおいてビームテストを行ない、可視部において予想通りの光を得ることができた。

2. 理論及びアンチデュレータ用空洞

図-1 にマイクロ波アンチデュレータ用の基本的なメカニズムを示す。空洞の中にTEモードのマイクロ波を満たしておき、

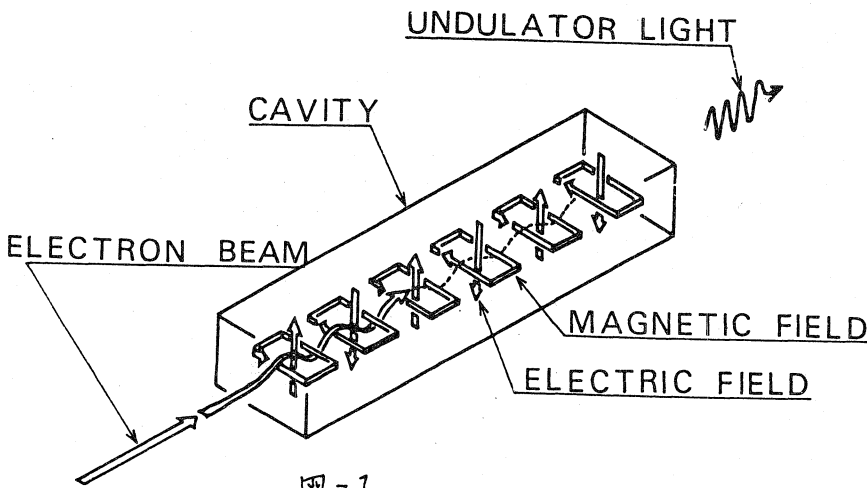


図-1

ここへ電子ビームを通すと電界と磁界の両方によって電子は振動させられる。このとき電子が感じる力を静磁場のみによる力とおきかえたときの磁場を等価磁場と定義すると、

$$B_{eq} = (1 + \frac{\sum E_w}{Z_w}) \frac{E_0}{2C} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $Z_w$ はマイクロ波の自由空間

及び空洞内のインピーダンス,  $E_0$ はピーク電界である。この $E_0$ に対してトランスバースシフトインピーダンス  $R_{sh}(\Omega/m)$ を定義した。

$$E_0 = \sqrt{2 R_{sh} P_0} \quad (2) \quad P_0: \text{単位長さ当りのマイクロ波パワー}$$

また電子の振動する周期(Period)  $\lambda_u$ は

$$\lambda_u = \frac{\lambda \lambda_g}{\lambda + \lambda_g} \quad (3)$$

ここで  $\lambda, \lambda_g$ はマイクロ波の自由空間及び空洞内の波長である。発生する光の波長や強度は、上で定義した  $B_{eq}, \lambda_u$ を使用すれば通常のアンチユレータと同じであり、波長については、

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left( 1 + \frac{1}{2}k^2 + \gamma^2\theta^2 \right) \quad (4)$$

$$k \approx \lambda_u (\text{cm}) \cdot B_{eq} (\text{kG}) / 10 \quad (5)$$

によって与えられる。ここで $\theta$ は観測者とアンチユレータ軸との開き角である。

製作したアンチユレータ空洞を図-2に、主なパラメータを表-1に示す。できるだけ大きな等価磁界を発生させるために、方形導波管を縦に2つ割りにし、この間に銅のアブロックをはさみ、ギャップを形成して電磁界を軸付近へ集中させた。マイクロ波のモードは基本的にはTEモードであり、軸方向に9.5波長である。実験では300kW, 4 $\mu$ Sec, 10ppsのパルスマイクロ波を導入した。このときの最大電界は12.8 MeV/m, 等価磁界0.43kGであった。一時的に450kWまで入力してみたが、パワー軸送ラインの方形同軸変換器(SF<sub>6</sub>ガス1atm)付近で放電したため、余裕をみて300kWとした。このときのアンチユレータのkパラメータは0.24であり、十分に観測できる強度の光が得られることが予想された。マイクロ波はSバンド(波長10.5cm)であり、等価アンチユレータ波長は(3)式より5.5cmが得られ、空洞の長さをこの波長で割ると周期数が20となる。

## PARAMETERS

Length	1093 mm
Cross section	80 × 34 mm
Gap	20 × 10 mm
Material	OFHC copper
Frequency	2856 MHz
Mode	TE <sub>1,0,19</sub>
Q <sub>0</sub>	7100
Transverse shunt impedance	300 M $\Omega$ /m
Microwave power	300 kW
Peak electric field	12.8 MV/m
Equivalent magnetic field	430 Gauss
Equivalent period	5.5 cm
K-parameter	0.24
Number of period	20

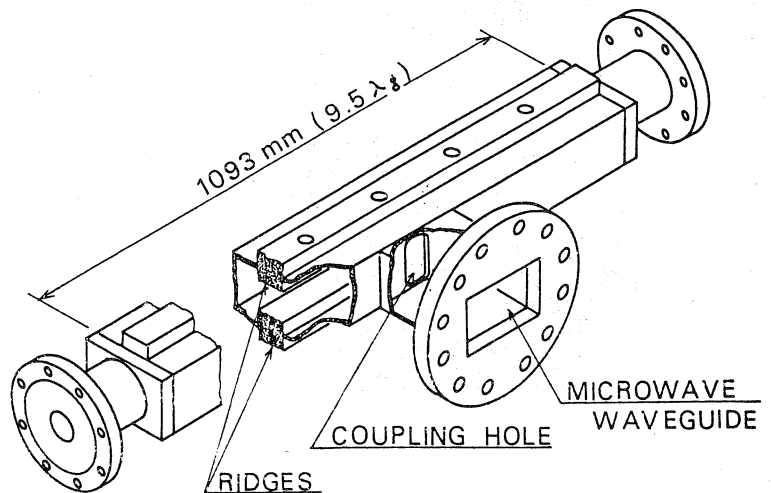


表-1

図-2. アンチユレータ用空洞.

### 3. 実験及び実験結果

アンジュレータを図-3に示すように、KEK-PF電子ライナックの500 MeVビームラインにセットした。マイクロ波のパワーは第2セクターの加速管の出口に12dBの方向性結合器を設け、300 kWを同軸ライン(39D)によって輸送している。電子ビームはエネルギー幅の5%のコリメータを通り、アンジュレータに通される。発生した光は、下流のベンディングマグネットの枝管からミラーとガラスウィンドウを通して、TVカメラ分光装置へ送りこまれる。図-4はこのようにして得られたアンジュレータ光の写真である。(a)はマイクロ波のパワーをOFFにしたときであり、アンジュレータ前後にベンディング磁石があるために、左右に2つのシンクロトン光が見える。(b)はアンジュレータのパワーをONにしたとき、環状のアンジュレータ光が現われているのがわかる。図-5は、

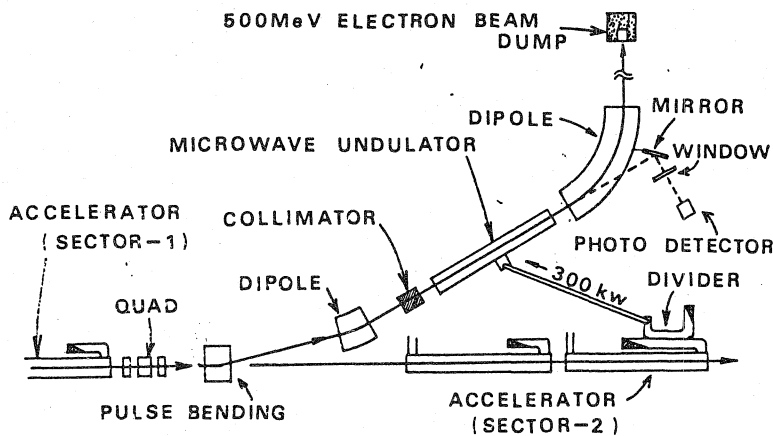
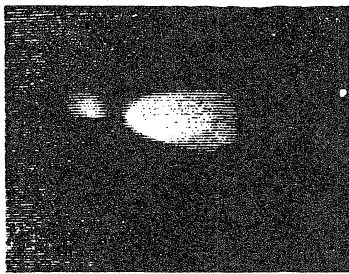
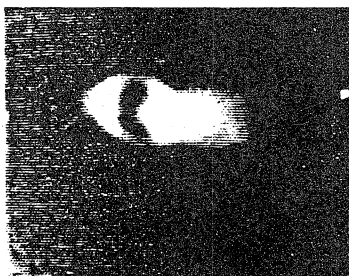


図-3. 実験のセットアップ

中心軸上の波長を図中の矢印で示したように可視部に調整したときの強度スペクトルであり、スペクトルの位置は理論値とよく合っており、強度は1.5倍ほど測定値の方が大きい。これは電子ビーム強度がふらついたためであろう。

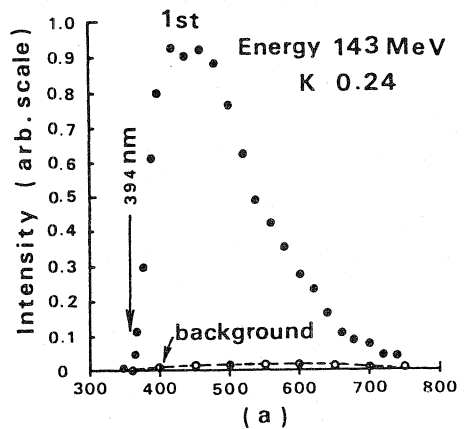


(a) Undulator being switched off

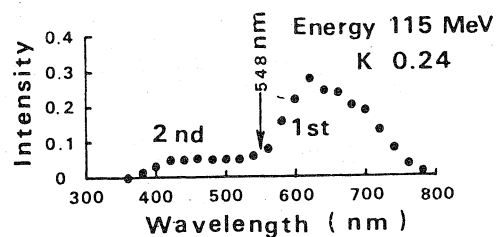


(b) Undulator being switched on  
Energy 220 MeV

図-4. アンジュレータ光



(a)



(b)

図-5. アンジュレータ光 スペクトル