

[13P-27]

## OBSERVATION OF IR SPONTANEOUS RADIATION AT LEBRA

Y. Hayakawa\*, I. Sato, K. Sato, K. Hayakawa, T. Tanaka, Y. Matsubara,  
 H. Nakazawa<sup>A)</sup>, K. Yokoyama<sup>A)</sup>, K. Kanno<sup>A)</sup>, T. Sakai<sup>A)</sup>,  
 K. Ishiwata<sup>A)</sup>, H. Inokawa<sup>A)</sup>, Y. Nakamura<sup>A)</sup>

Atomic Energy Research Institute, Nihon University  
 7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501 Japan

<sup>A)</sup>College of Science and Technology, Nihon University  
 7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501 Japan

### Abstract

The FEL system of the Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) of Nihon University was reconstructed for the infrared region (IR) from 0.8  $\mu\text{m}$  to 5  $\mu\text{m}$ . In order to check the performance, the spontaneous radiations generated by the new undulator were observed using a CCD video camera. It was demonstrated that the wavelength of the visible spontaneous radiations, which correspond to the higher harmonics, can be controlled by adjustment of the undulator gap width.

The time structure of the radiation measured by a photo detector indicates that the yield of the radiation has the linearity to the electron beam current and the undulator generates enough IR radiation. The spectra of the 2nd and 3rd harmonic radiation with much narrow widths were also obtained. These results mean that the new undulator works as an IR photon generator.

### 日大FEL赤外放射光の観測

#### 1. はじめに

日大原子力研究所電子線利用研究施設 (LEBRA) では1998年に125 MeV電子線形加速器による電子ビームの加速に成功し、可視光用アンジューレ<sup>1)</sup> による自発放射光の発生を確認した [1, 2]。その後、より詳しくアンジューレ<sup>2)</sup> 自発放射光の測定を行なったところ、アンジューレ<sup>3)</sup> 磁場の不整を示唆するおなスペクトルが得られた [3]。実際、アンジューレ<sup>4)</sup> 磁石列の磁場測定によって永久磁石の磁束密度の減少と磁場分布の不整が確認された。不整になった磁場分布と磁石列の放射化の程度に相関が見られることから、この現象は放射線によるダメージ<sup>5)</sup> と思われる [4]。永久磁石の材質に採用しているNd-Fe-Bには熱に弱いという特性がありQQ<sup>6)</sup> 磁力が減少することから、アンジューレ<sup>7)</sup> 通過中にロスした電子ビームの照射によって局所的な温度上昇が発生したことが減磁の主な原因の1つとして考えられる。

今回、アンジューレ<sup>8)</sup> を修理するにあたって、そのまま可視光用アンジューレ<sup>9)</sup> として復元するのではなく近赤外EL<sup>10)</sup> 用アンジューレ<sup>11)</sup> として改造することにした [5]。そのため周期長<sup>12)</sup> を従来の2倍の48 mmにした磁石列を新たに製作し、既存の磁石列との交換を行なった。新しい赤外用アンジューレ<sup>13)</sup> 磁石列長800 mm<sup>14)</sup> から5  $\mu\text{m}$  までの領域をカバーでき<sup>15)</sup>

Table I 電子線形加速器と赤外EL発生装置の仕様

最大電子ビームエネルギー	125 MeV
ビーム電流	200 mA
マクロパルス幅	20 $\mu\text{s}$
繰り返し	12.5 Hz
アンジューレ <sup>16)</sup> 磁気回路	ハルバック方式
周期長	48 mm
周期数	50
磁石材質	Nd-Fe-B
最大磁束密度	1.28 T
ギャップ間隔	29~40 mm
実効K値	0.57~1.2
放射光の基本波長	0.8~5 $\mu\text{m}$
光空洞の長さ	6718 mm
光共振器ミラ	誘電体多層膜
FEL平均出力	1~6 W

に設計されている [6]。現在は波長1.5  $\mu\text{m}$  での赤外FELの発振を目指しており、この波長に合わせた多層膜ミラ<sup>17)</sup> を光共振器の反射鏡として使用している。電子線形加速器と赤外FEL用アンジューレ<sup>18)</sup> の仕様をTable Iにアンジューレ<sup>19)</sup> ギャップ間隔と発生する自発放射光の波長との関係をFig. 1にそれ<sup>20)</sup>を示す。

\*e-mail: yahay@acc.phys.cst.nihon-u.ac.jp

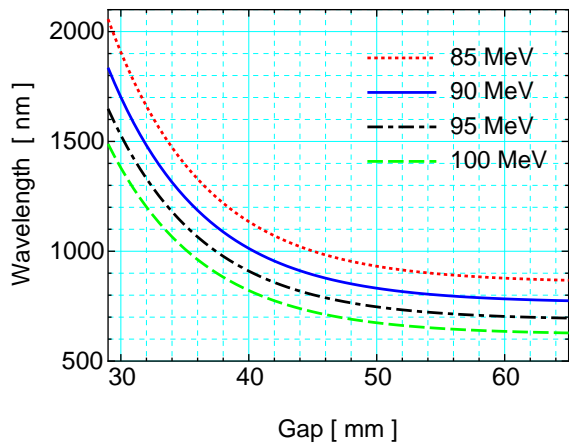


Figure 1: アンジュレータギャップ間隔と発生する自発放射光の中心波長の関係。

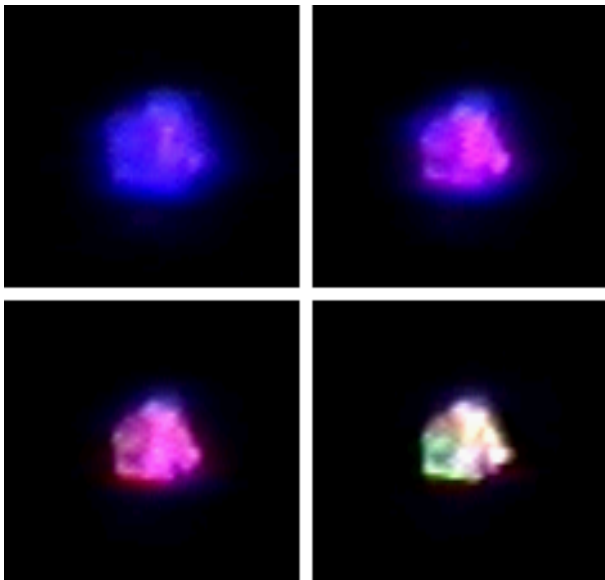


Figure 2: CCD ビデオカメラで観測した自発放射光の2次及び3次高調波。電子ビームのエネルギーは98 MeV、アンジュレータギャップ間隔はそれぞれ左上31 mm、右上32 mm、左下33 mm、右下34 mm。

## 2. 自発放射光の観測

赤外用に改造されたアンジュレータによって実際に放射光が発生するかどうかを確認するために、CCDビデオカメラを用いた観測を行なった。電子ビームのエネルギーが98 MeVの時、アンジュレータのギャップ間隔が29 mmから40 mmまでの範囲(実効K値1.18~0.57)で可視光の自発放射光を観測することができた。この条件で理論的に見積もられる基本波は近赤外領域の光となるため、観測されたのは2次及び3次高調波であると考えられる。Fig. 2は金属ミラーを使って輸送された放射光を望遠鏡で集光し、それをCCDビデオカメラで撮影して得られた画像の一部である。ギャップ間隔の調整によって光の色が変化していくこ

とも確認でき、この新しい赤外用アンジュレータが放射光発生装置として機能していることが分かった。

## 3. フォトダイオードによる放射光パルスの測定

CCDビデオカメラによる観測と同様に、放射光パルスの時間的な構造を調べるために望遠鏡で集光した自発放射光をSiフォトダイオード検出器で測定した。オシロスコープを使って取得した光検出器の出力をFig. 3に示す。この検出器の感度は長波長側で1  $\mu\text{m}$ 程度までしかない。従って自発放射光基本波の中心波長がおおよそ1  $\mu\text{m}$ となる電子ビームエネルギー96 MeV、アンジュレータギャップ間隔36.5 mmという条件で測定した。Fig. 3の上図は放射光による信号とアンジュレータの直前に設置されたコアモニターで測定したビーム電流とを比較したものである。両者の時間構造が非常に良く一致していることから、測定された光は電子ビームで生成された自発放射光であり、その光量がアンジュレータを通過する電荷量に対して良い線形性を持っていることが分かる。

下図では赤外透過フィルター(透過率: 50%@1  $\mu\text{m}$ , 10%@770 nm)を通して放射光を測定した場合と直

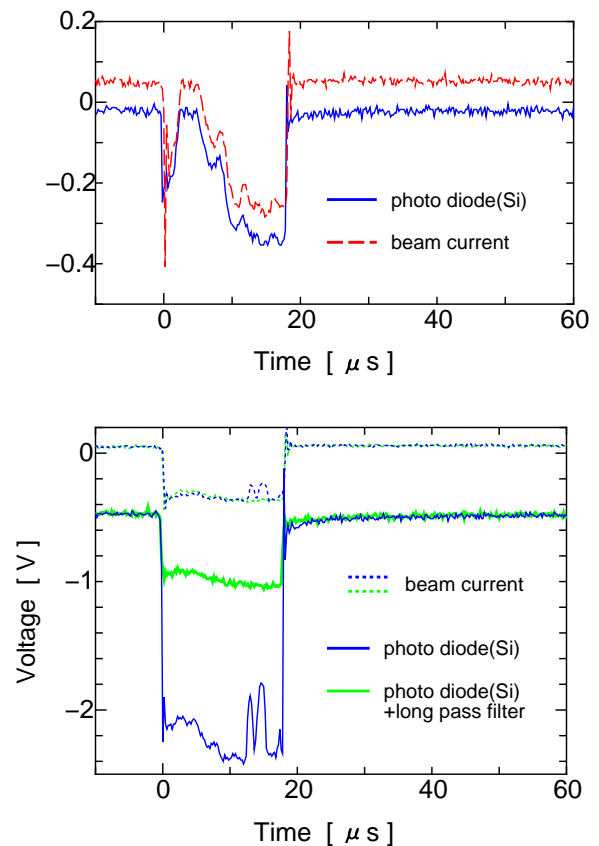


Figure 3: 赤外用アンジュレータで発生した自発放射光パルスの時間構造。上: ビーム電流の信号との比較。下: 赤外透過フィルターを使用の有無による違い。この時の電子ビームのエネルギーは96 MeV、アンジュレータギャップ間隔は36.5 mm。

接測定した場合を比較している。図にあるようにビーム電流はほぼ同じであるが、光検出器の出力はフィルターを通して測定した方がおよそ1/3となった。この測定では望遠鏡による集光を行なっているため、検出器に入射する放射光には基本波と3次高調波だけではなく、見込み角のついた2次高調波が含まれている。可視光の主成分は2次高調波であると思われる。今回使用したフィルターの透過率をから、検出器のレスポンスの約半分は近赤外領域の光によるものと見積もることができる。さらに波長1  $\mu\text{m}$  の光に対するSiフォトダイオードの量子効率が可視領域の光に比べて約20%である点を考慮すると、検出器に到達した赤外領域の基本波の強度は可視光である2次、3次高調波の4~5倍程度と評価できる。この光検出器のレスポンスが波長633 nmの光に対して2 V/1 mWであることから、少なくとも2 mW程度の赤外自発放射光が発生していることになる。

#### 4. 自発放射光のスペクトル

赤外自発放射光の発生が確認できたため、次に放射光のスペクトルを測定することを試みた。Fig. 4は電子ビームエネルギー96 MeV、アンジュレータギャップ

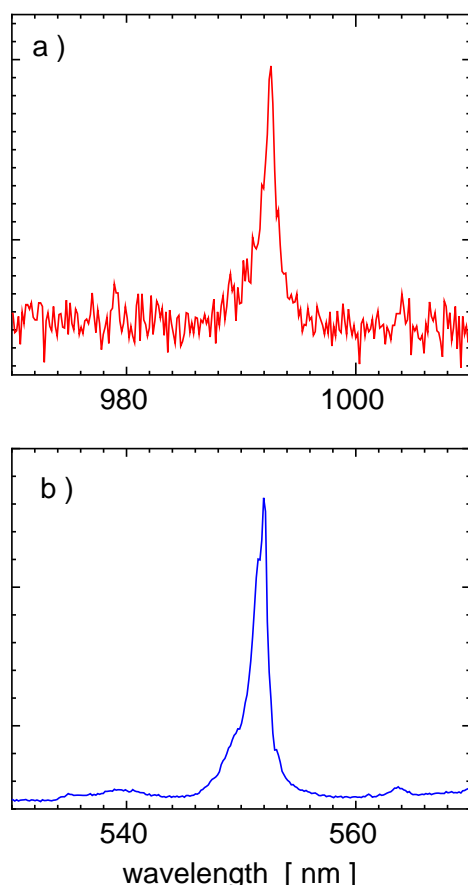


Figure 4: 分光器で測定した自発放射光のスペクトル。a)2次高調波、b)3次高調波と考えられる。測定時の電子ビームエネルギーは96 MeV、アンジュレータギャップ間隔は37 mmである。

間隔37 mmという条件で、グレーティング方式の分光器を用いて測定された結果である。分光器のイメージング装置としてCCDカメラを使用しており、そのシャッターをリニアックのマクロパルスと同期させることが可能である[7]。今回は露光時間は30 msで測定した。この測定で得られたスペクトルは近赤外、可視共にアンジュレータの周期数で決まる基本波の半幅2%より狭い幅をもっている。この原因として、見込み角がついた放射光のスペクトルを測定してしまったことが考えられる。自発放射光はアライメント用レーザと異なり望遠鏡で集光後再び発散してから分光器に入射するため、アライメントが不十分であった可能性がある。Fig. 4のa)、b)はそれぞれ見込み角がついたためにピーク波長が長波長側にシフトした2次、3次高調波であると思われる。

#### 5. まとめと今後の課題

近赤外FEL用に改造されたアンジュレータによる放射光の発生を試みた。その結果、可視領域の自発放射光をビデオカメラで観測することに成功し、アンジュレータギャップ間隔の調整による波長の変化も確認することができた。フォトダイオードを用いた測定では自発放射としては十分な強度の赤外放射光が発生していることがわかった。また分光器を使って高調波と思われる非常に狭い幅をもったスペクトルも得られた。以上の実験結果から、改造後のアンジュレータは近赤外放射光発生装置として概ね正常に機能しているものと考えられる。

今回、アンジュレータ自発放射光に対して行なわれたスペクトル測定はまだ予備的なものであり、分析も不十分である。今後より精密な測定をしていく必要がある。また、現在のFEL発生装置の発振波長に設定している1.5  $\mu\text{m}$ での測定を予定している。特に高速な赤外線検出器(Hg-Cd-Zn-Te)を用い、赤外放射光のビルドアップを観測することが重要な課題として挙げられる。

#### References

- [1] I. Sato et al., Proc. of 23rd Linear Accelerator Meeting in Japan, p. 22 (1998)
- [2] Y. Hayakawa et al., Proc. of 23rd Linear Accelerator Meeting in Japan, p. 334 (1998)
- [3] H. Nakazawa et al., Proc. of the 12th Symposium on Accelerator Science and Technology, p. 394 (1999)
- [4] I. Sata et al., Proc. of the 12th Symposium on Accelerator Science and Technology, p. 37 (1999)
- [5] I. Sato et al., Proc. of this Meeting.
- [6] K. Hayakawa et al., Proc. of this Meeting.
- [7] Y. Hayakawa et al., Proc. of 24th Linear Accelerator Meeting in Japan, p. 368 (1999)