

## 等時性電子周回リングを用いた超短パルスコヒーレントテラヘルツ光源の開発研究

Study and Development of Extremely Short Pulse Coherent Terahertz Light Source Employing an Electron Isochronous Ring

濱 広幸 (HAMA HIROYUKI)

東北大学・電子光理学研究センター・教授



### 研究の概要

先端的線形加速器から超短バンチ電子ビームを生成し、これを完全な等時性（アイソクロナス）を持つリングに入射してバンチ形状を保ったまま非破壊的に周回させ、強大でコヒーレントなテラヘルツ光をリング全周に渡って発生させることによって、マルチポートの実験ステーションに光を供給できる加速器光源を実証する。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用物理学一般

キーワード：コヒーレント放射、電子加速器、テラヘルツ光、アイソクロナスリング

### 1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ光の波長域は数十 $\mu\text{m}$ から数 $\text{mm}$ 程度の光と電波の中間の領域にある。生命科学においては、高分子の振動や回転などのエネルギー準位がこの領域の光で励起されるため、たんぱく質のグローバルな構造を調べる新しいプローブ光として注目を浴びている。物性分野においては高温超伝導を発端とした物質群で相転移をテラヘルツ光の照射によって引き起こす可能性などが示唆されており、新しい物質機能の創出が期待されている。一方、近年の技術進展によって先端的線形加速器からの高輝度電子バンチの進行方向の長さはテラヘルツ光の波長を大きく下回るほどになり、電子数の2乗に比例する高強度のコヒーレントなテラヘルツ光を放射することが期待される。

### 2. 研究の目的

線形加速器からの超短パルス電子ビームを生成・加速し、等時性ビーム光学を満たしたアイソクロナスリングに入射する。電子ビームは超短バンチ長を保ったまま、全ての偏向電磁石を通過する際に強大なコヒーレントなテラヘルツ光を発生することから、同時に複数ユーザーに光を供給できることになる。この光源加速器におけるキーテクノロジーは100フェムト秒以下の超短パルス電子ビームを安定生成する技術の確立及び非線形ビーム光学を駆使して完全な行路長補償を行うことができるアイソクロナスリングの

構築である。

### 3. 研究の方法

電子源には電子を陰極より引き出す空洞とこれを光速度近くまで加速する空洞の高周波パワーおよび位相を独立して変えることができる、熱陰極高周波電子銃を用いる。この高周波電子銃では電子ビームの運動量と縦方向位置の位相空間を、理想的な線形の関係にすることができ、適切なバンチ圧縮器を通過させて、非常に短いバンチ長を形成することが可能で、数値シミュレーションでは、約50フェムト秒のバンチ長となる結果が得られているが、実験的に検証することは本研究の成否の鍵を握る大きな最初の到達目標である。

バンチ内の殆ど全ての電子に対して等時性が長時間保たれ、多周回コヒーレント放射光源として機能するビーム貯蔵リングを実現するためには、リング周回における運動量分散依存の行路長偏差の補償が非線形効果も含めて要求される。更には行路長偏差には電子の横方向運動（ベータトロン振動）の大きさにも依存する効果も無視しがたく、これも同時に補正したラティス設計が必要とされる。理論的な考察をふまえ、周長20m程度のコンパクトなアイソクロナスリング試験機を製作して、線形加速器から入射される超短パルス電子ビームがバンチ伸長せず、全ての偏向磁石から高強度のコヒーレントTHz放射が発生することを実証する。

#### 4. これまでの成果

電子源およびアルファ磁石における集団的なビーム運動を複数のシミュレーションコードで調査した。ビームが受ける空間電荷効果の評価においては、独自開発した時間発展マックスウェル方程式を数値的に解くFDTD（時間領域差分法）コードを用い、低エネルギー領域における空間電荷効果は、従来は詳しく調べられていなかったため、本研究の成果は大きい。FDTD コードは非常に大きなCPU 能力を必要とするので、計算精度を若干犠牲にせざるを得ないが、本研究で用いる高周波電子銃からの 2MeV 以下のビームでは比較的乱れの少ない電子の位相空間分布が得られることが分かった。また、本研究において採用する速度圧縮法による短バンチ生成では、アルファ磁石内でバンチを圧縮しないため、空間電荷効果の影響は小さいことが明らかになった。

偏向電磁石等からのコヒーレント放射強度の理論計算に加えて、ファブリペロー共振器型の共鳴波長より短い電子バンチによる自由電子レーザー（Bunched-FEL）の発振理論及び1次元 FEL 方程式によるシミュレーション研究を行った。このBunched-FEL は初めて提案されたもので、従来の共振器型 FEL と異なる飽和過程を持ち、ユニークな光源として注目される。本研究で開発するマルチバンチモードの100フェムト秒以下の超短パルスビームが安定に生成されれば、この新奇性の高いテラヘルツ波長域の超高強度光源が達成できると予想される。

独自に考案した独立2空洞型熱陰極高周波電子銃と、アルファ電磁石からなる入射器の構成機器を開発するとともに、加速高周波源であるクライストロンモジュレータの本格設置が完了し、ビームテストが行えるような実験室環境を整備した。また長期試験運転も問題なく終えている。高周波電子銃については計算値に近いQ値を安定に得ることができ、また内部に装填した単結晶のLaB<sub>6</sub>陰極を1800Kまで昇温しても、電子銃の高周波特性が変化しないことも確認して、実証実験の準備が整いつつある。

超短パルス生成のために速度圧縮法についてビーム動力的な考察を加えていたが、この手法は熱陰極電子銃からのビームに良く適合するバンチ圧縮法であることを定量的に示すことができ、本研究によって速度圧縮のより本質的な機能が明らかになった。

当初デザインのラティスは力学的口径が不十分のためにビーム周回が非常に困難とされたが、アイソクロナスリングのビーム軌道解析が進展した結果、新たなラティスデザインが固まった。しかしながらより大きなアクセプタンスを得るために、ビームの行路長偏差に強く働く3次の運動量依存効果の抑制に8極磁石を導入すべきか、今後の課題と

している。

#### 5. 今後の計画

最も重要な装置の一つである加速高周波システムにおいては、クライストロンモジュレータおよび導波管等の伝送系も含めて機能的で信頼性が高いものを構築できた。すでにこのシステムを用いて電子銃のハイパワー試験を終えており、実負荷実験を開始して電子ビームの特性を把握してゆく。

速度圧縮法による超短パルス電子ビームの生成については、3次元 FDTD シミュレーションによって、バンチ圧縮過程のビーム動力学をほぼ理解できた。また、荷電粒子からの放射について多体の荷電粒子との相互作用の理論計算を引き続き行う。これまでと同等の研究活動を維持すれば、ハードウェアの健全性に重大な問題が発生しない限り、研究期間内で実証実験の遂行が可能だとされる。満足される光源性能が達成すれば、構築した加速器システムは種々のテラヘルツ光利用研究分野の全国共同研究に供されることになる。

#### 6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

1. H. Hama, M. Yasuda, M. Kawai, F. Hinode, K. Nanbu, F. Miyahara, Intense Coherent Terahertz Generation from Accelerator-based Sources, Nucl. Instr. and Meth. A (2010), in press and available online.
2. F. Hinode, M. Kawai, K. Nanbu, F. Miyahara, H. Hama, Expected Performance of a Planar Undulator Designed for the Terahertz Source Project at Tohoku University, Nucl. Instr. and Meth. A (2010) in press and available online.
3. H. Hama, F. Hinode, M. Kawai, Kenichi Nanbu, F. Miyahara and M. Yasuda, A Far-infrared Undulator for Coherent Synchrotron Radiation and Free Electron Laser at Tohoku University, AIP Proceedings, 1234, pp523-526 (2010).
4. H. Hama, M. Kawai, F. Hinode, K. Nanbu, F. Miyahara, M. Yasuda, Development of Accelerator-based THz Source at Tohoku University, Proc. Particle Accelerator Conference 2009, pp2386-2388 (2009).
5. H. Hama, F. Hinode, K. Kasamsook, M. Kawai, K. Nanbu, M. Yasuda, Space Charge Effect for Short Electron Bunches in an Alpha Magnet, Proc. International Free Electron Laser Conference 2008, pp305-308 (2008).

ホームページ等

<http://tansei.lns.tohoku.ac.jp/abpg/>