

DEVELOPMENT OF COHERENT TERAHERTZ LIGHT SOURCE USING VERY SHORT ELECTRON BUNCH *

Fujio Hinode ¹, Masayuki Kawai, Akira Kurihara, Yoshinobu Shibasaki, Shigenobu Takahashi,
Kenichi Nanbu, Hiroyuki Hama, Mafuyu Yasuda
Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University
1-2-1 Mikamine, Sendai, Miyagi, 982-0826

Abstract

A design work of a coherent THz light source project has been progressed in Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University. The construction of a prototype light source accelerator was approved in this year. This prototype accelerator consists of 50 MeV injector and isochronous light source ring. The present status of the injector design is reported.

フェムト秒コヒーレントTHz 光源の開発

1. はじめに

東北大学 原子核理学研究施設では、これまで非常に高強度なコヒーレントテラヘルツ光の生成を目指した光源加速器の開発研究を進めてきた^[1]。そして本年度より新たに5年間の計画で、このための原理実証を目的とした試験加速器を建設することとなった。この試験加速器は、100フェムト秒程度の非常に短い電子バンチを生成し 50 MeV まで加速する入射器と、そのバンチ長をリング全てにおいて短く保存したままテラヘルツ域のコヒーレント放射光を発生させるアイソクロナスリングにより構成されている。

このアイソクロナスリングから発生する光パルスの長さは電子のバンチ長と同一なので、テラヘルツ光の電場変化は半波長以下となり、このような特異な光を利用することで新しい化学反応の制御を行える可能性がある。また高強度な特徴を活かし、近接場分光を用いた従来にない高分解能なイメージングへの応用なども考えられ、加速器光源による新しいテラヘルツ科学の創出^[2]が期待できる。

現在、空間電荷効果を考慮した上で、バンチ圧縮器にアルファ電磁石を用いてコンパクトな入射器を構築すべく、設計を進めている。本稿では、入射器の設計を中心に、試験加速器の建設の現状について報告する。

2. 試験加速器

2.1 概要

試験加速器の概要を図1に示す。入射器は互いに独立した2空洞からなる熱陰極高周波電子銃^[3]とアルファ電磁石^[4,5]、加速管、シケイン型バンチ圧縮器からなり、50 MW S-band クライストロンから

の RF 電力を分配して、高周波電子銃と 3 m 加速管に供給する予定である。

当初は高次の運動量まで補正することを考慮して、6極電磁石を含めた Triple Bend Acromat 光学系のバンチ圧縮器を検討してきた^[6]。しかし最近になって、General Particle Tracer (GPT)^[7] や我々の開発した FDTD code^[8] を用いたシミュレーションによる検討の結果、2 MeV 以下の低いビームエネルギーにおいては、空間電荷効果によるバンチ伸長やエミッタンス増大が無視できないことが分かった。このため電子銃から出たビームは可能な限り短い距離で加速管に導く必要があり、初段のバンチ圧縮にはアルファ電磁石を用いて全体をコンパクトに構築するとともに、加速後にシケイン型のバンチ圧縮器を導入した、より自由度の高い設計を進めている。

2.2 電子銃

これまで独立2空洞型の熱陰極高周波電子銃の開発をすすめてきたが、昨年度末に実機が完成し、現在は高電力試験を実施する準備を進めている。表1に、この電子銃の運転パラメータとともに、測定されたデータを示す。

表1：高周波電子銃のパラメータ

運転パラメータ	
1 st セルの最大電場強度	25 MV/m
2 nd セルの最大電場強度	60 MV/m
セル間の位相差	180+24 deg
カソード電流密度	50 A/cm ²
測定データ	
(f_1, f_2)	(2851.8, 2854.9) GHz
(β_1, β_2)	(1.9, 5.3)
Unloaded-Q (Q_1, Q_2)	(3041, 13658)

* Work supported by the Grants-in-Aid of Japan Society for the Promotion of Science, contract No. 20226003.

¹ E-mail: hinode@lns.tohoku.ac.jp

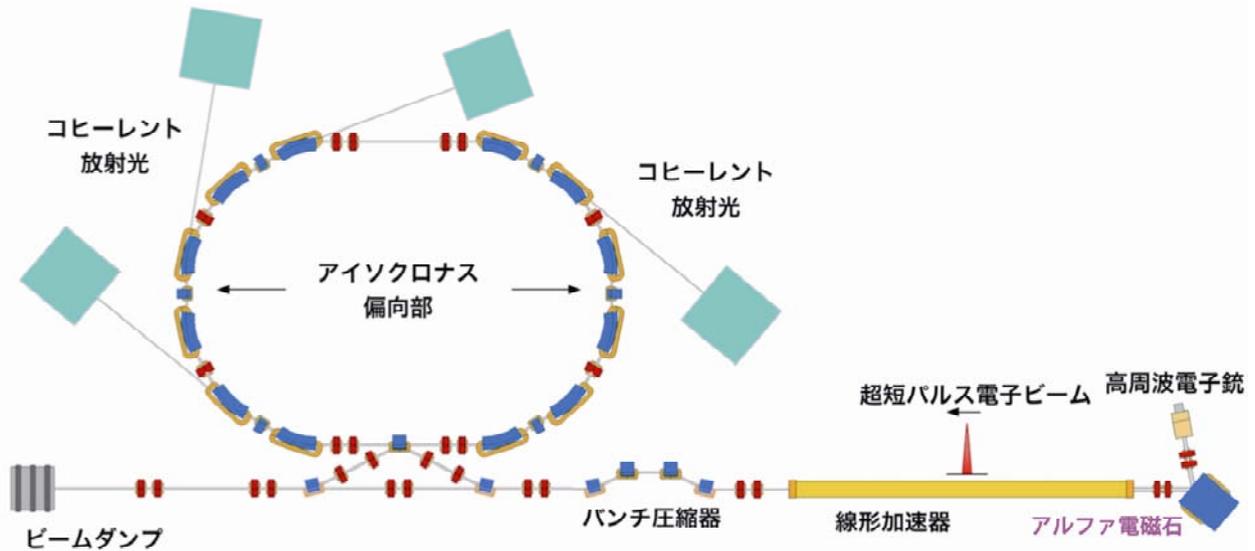


図1：50 MeV 試験加速器の概要図。

電子銃から得られるビームの運動エネルギーは 0 から最大 1.5 MeV まで広く分布しており、このため次節に述べるアルファ電磁石部に設けたスリットで 2 % 程度のエネルギー広がりを残して、低エネルギー部は削り取られる。切り出されたビームに対応する初期の時間広がり、電子銃出口部で 3.5 ps、電荷量は 20 pC/bunch、規格化エミッタンスは $0.7 \pi \text{ mm-mrad (rms)}$ と見込まれている。

2.3 アルファ電磁石

アルファ電磁石は、これまで熱陰極高周波電子銃においては広く用いられており、縦方向位相空間における相関を利用することで、バンチ長を制御することを可能にする。いま加速管の入り口でバンチ長を最も短くすると考えた時、アルファ電磁石前後のドリフト空間の長さの和を $L_{drift} \text{ [m]}$ 、電子銃出口での初期の時間-エネルギー相関の傾きを $dt/d\delta \text{ [s]}$ 、アルファ電磁石の磁場強度を $G \text{ [T/m]}$ とすると、以下のように表すことができる^[5]。

$$c \frac{dt}{d\delta} + L_{drift} \left(\beta_0 - \frac{1}{\beta_0} \right) + \sqrt{\frac{p_0}{G m_e}} K_\alpha \left(\beta_0 - \frac{1}{2\beta_0} \right) = 0 \quad (1)$$

ここで、 c : 光速、 δ : エネルギー広がり、 p_0 : 中心運動量、 β_0 : 光速で規格化された電子速度、 m_e : 電子質量、 K_α : アルファ電磁石中の軌道に関わる定数である。第1項は電子銃出口部での初期位相分布を、第2項は有限な速度差から生じる行路差を表しており、ともに負の値を持つ。これらを第3項のアルファ電磁石が有するエネルギー依存の行路差で補正している。ビームの全エネルギーが 2 MeV 程度と低い場合、第2項は、第1項と同程度の大きさを持つ。図2は、アルファ電磁石の磁場勾配をドリフト空間の長さの関数として表した物である。十分なドリフト空間を確保しようとする、弱い磁場勾配で運転することになり、要求される磁場の一様領域は広く

なってしまう。四極電磁石やステアリング電磁石、ビームモニターなどを設置するために、アルファ電磁石の前後に、最低でも各々 40 cm 程度の空間が必要と考え、必要な磁場勾配は 2.7 T/m となる。

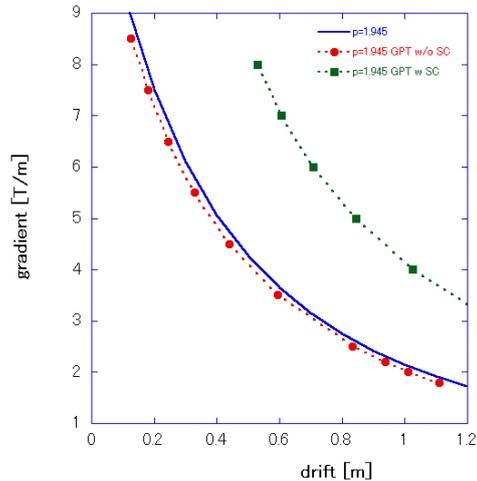


図2：ドリフト空間の長さに対応するアルファ電磁石の磁場勾配。青の実線はモデル計算の結果、プロットは GPT によるシミュレーション結果（赤：空間電荷効果なし、緑：空間電荷効果あり）。

図2のプロットは GPT を用いたシミュレーションの結果である。空間電荷効果を含めない場合、モデル計算と矛盾の無い結果が得られている。次に GPT において空間電荷効果を含めてシミュレーションを実行した。用いた空間電荷効果モデルでは3次元のマクロ粒子間相互作用を仮定している。四極電磁石を配置することを考慮して、電子銃とアルファ電磁石の間には、現実的と思われる 40 cm のドリフト空間を割り当てた。この時の結果を図2の緑のプロットで示してある。空間電荷効果を含めた場合、

必要な磁場勾配が極めて大きくなることが分かった。縦方向位相空間の傾きは、空間電荷効果を含めても大きな変化はないので、これはエネルギー広がりが増大とこれによる行路長の差の拡大が原因と考えている。現実的な問題として、アルファ電磁石の磁場勾配を決定するに際して、この評価がどの程度の信頼性を有しているかは議論の余地があるところであり、事実、ウェーク場の影響は大きいと考えられるにもかかわらず GPT においてはそういった効果は考慮されてはいないため、その限界は指摘されるところである。しかし全く独立に FDTD コードによる評価も実施したところ GPT と同様の傾向が得られていることから、アルファ電磁石の磁場勾配としては 5 T/m で運転することを念頭に置き、余裕を見て 6 T/m の磁石を設計することとした。表 2 に、アルファ電磁石の主要パラメータを示す。

表 2 : アルファ電磁石のパラメータ

最大磁場勾配	6 T/m
ボア半径	55 mm
最大有効磁場領域	80 mm
磁極長	150 mm
コイル	8×8 mm, 33 turn
電流、電圧	250 A, 5.6 V
冷却方式	直接水冷

図 3 は、GPT により得られたアルファ電磁石中の粒子軌道とビームの形状である。電子銃とアルファ電磁石間のドリフト空間において、空間電荷効果により、エネルギー広がりが増大とともに、横方向エミッタンスの増大が生じており、この影響を緩和するように四極電磁石の調整を行っている。この結果、加速管入り口部でのパンチ長を $\sigma_z = 221$ fs まで短くすることができた。横方向規格化エミッタンスは 2.5π mm-mrad である。図 4 には、この時の加速管入り口部での縦方向位相空間分布を示した。四極電磁石については、最終的には加速管下流のシケインを用いて目標とするパラメータが実現できるように最適化を行う必要があり、現在、設計を進めている。

4. まとめと今後の予定

今年度より 5 年間の計画でコヒーレント THz 光源用試験加速器の建設を進めている。初年度の本年は、アルファ電磁石や真空系の設計・製作を行い、来年度中には入射部のビーム運転を開始する予定である。高周波電子銃の大電力試験は間もなく実施の予定で、このための試験用 R F 電力源は既に整備されている。シケイン型パンチ圧縮器やアイソクロナスリングの具体的な設計は、今後の課題として残されている。また GPT による結果の信頼性については、FDTD コードや実際のビームテストとの比較を行いながら、今後も評価を行っていきたいと考えている。

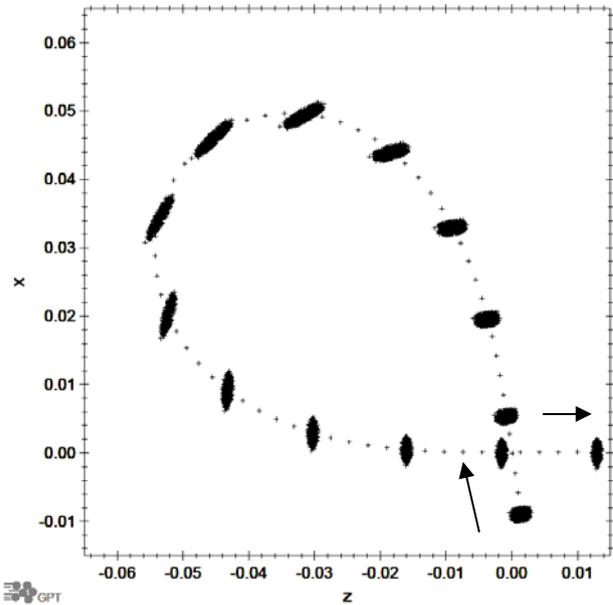


図 3 : アルファ電磁石中の粒子軌道とビーム形状。単位は[m]。ビームの全エネルギー = 2.0 [MeV]、磁場勾配 = 5 [T/m] の場合。

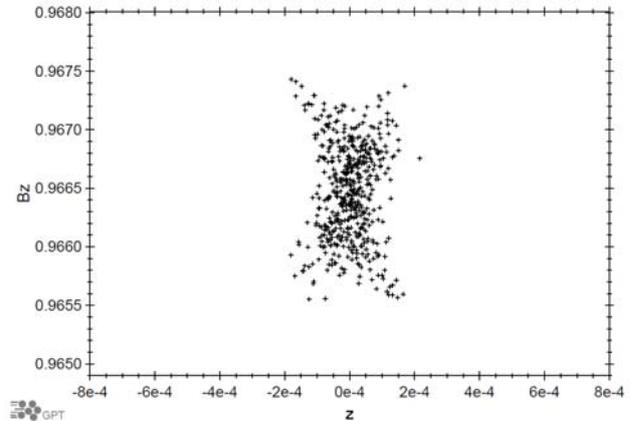


図 4 : 加速管入り口部での縦方向位相空間分布。

参考文献

- [1] H. Hama et al., New Jour. of Phys. 8(2006) 292
- [2] http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/THz_rpt.pdf
- [3] T. Tanaka, et al., Proc. of the 27th International FEL Conf., Stanford, U.S.A., pp. 142
- [4] H. A. Enge, Rev. Sci. Instrum. 34 (1963) 385
- [5] M. Borland, Ph.D. Thesis, Stanford University, 1991
- [6] T. Muto et al., Proc. of the 29th International FEL Conf., Novosibirsk, Russia, pp. 476
- [7] <http://www.pulsar.nl/gpt>
- [8] H. Hama et al., Nucl. Instr. and Meth. A 528 (2004) 371