

Development of Test Accelerator as Coherent THz Source at Tohoku University

Fujio Hinode #, Shigeru Kashiwagi, Masayuki Kawai, Kenichi Nanbu, Fusashi Miyahara, Toshiya Muto, Yoshinobu Shibasaki, Shigenobu Takahashi, Ikuro Nagasawa, Yuu Tanaka and Hiroyuki Hama
 Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University,
 Mikamine 1-2-1, Sendai 982-0826

Abstract

A test accelerator for the coherent terahertz source (t-ACTS) has been under development at Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University. Intense coherent terahertz radiation will be generated by the very short electron bunch less than 100 fs using a thermionic RF gun. Although there was a serious problem in the RF characteristics for the manufactured gun caused by the insufficient contact between the cavity wall and the cathode endplate, it was solved by putting a gold wire into the gap to secure the RF contact between them. The measurement of RF characteristics is now in progress and the high power test of the gun will be restarted soon. In this article, we report the development of the RF gun and also present the status of the test accelerator.

東北大学コヒーレントTHz光源用試験加速器の開発

1. はじめに

東北大学電子光物理学研究センター（旧核理研）では、超短パルス電子ビームからの高強度コヒーレント放射の生成を実証すべく試験加速器 t-ACTS (test Accelerator as Coherent Terahertz Source) の開発を進めている^[1]。試験加速器の入射部は、独立二空洞型の熱陰極高周波電子銃(independently tunable cells [ITC] RF gun) とアルファ電磁石、3m 加速管そして磁気バンチ圧縮器などからなり、これにより 100 フェムト秒以下の超短パルス電子ビームを安定に生成することを目指している。ITC RF gun については、昨年の本会議に於いて大電力試験の状況を報告したが、電子銃空洞本体とカソード端板の間の電氣的接触が不十分なことに起因して、電子銃空洞の温度変化によりカソードセルの高周波特性が著しく変動する現象が問題となっていた^[2]。本稿では、このために実施した対処の概要とその結果を報告する。またカソード設置誤差のビームに与える影響の評価なども進めており、これら電子銃の開発とあわせて、試験加速器の現状について報告する。

2. 電氣接触の改善と高周波特性の回復

ITC RF gun については、これまで電子銃空洞本体とカソード端板の間の電氣的接触が不十分なことに起因して、カソードセルに対するQ値や結合度といった高周波特性が非常に不安定であることが問題となっていた。その後の調査により、カソード端板の強度が十分ではなく、このために真空封止に用いたメタルO-リングをつぶす際にカソード端板が変形してしまうことなどが判明し、対処として締め付けトルクが小さくてすむ特殊なガスケットを新たに製作することとした^[3]。また電氣的接触が不十分な箇所の際間部に金線を挟み込むことで接触の回復を図り、これによりほぼ設計通りの高周波特性を実現

することができた^[4]。表1に設計値と共に高周波特性の測定結果を示してある。改善前には 3000 程度しかなかった無負荷Q値も 8000 近くまで回復することができた。またこれと共に、端板に外部から力を加えると高周波特性が大きく変動していた不安定な振る舞いも見られなくなった。

表1：ITC RF gun の高周波特性の測定結果

		design	measured
f ₁	cathode cell [MHz]	2856	2857
f ₂	acc. cell [MHz]	2856	2855
	coupling β ₁	~4	4.9
	coupling β ₂	~4	5.3
Q ₀	cathode cell	9500	7900
Q ₀	acc. cell	12500	13700

高周波特性の安定性については、さらにカソードヒーターの通電と空洞本体の温度変化の各々についても確認を行った。カソードヒーターについては、想定される温度 (~1800 K 以下) よりも十分高い ~1900 K (ヒーター電流=9 A, 消費電力 ~10 W) まで昇温して、共振周波数や反射特性の変化を測定し、異常な振る舞いがないことを確認した。図1はヒーター通電時のカソードの様子を撮影したもので電子銃下流側からカソードを見ている。右下は中央部分の拡大写真で白熱しているのが直径 1.8 mm の LaB₆ カソードである。カソードからの輻射熱によりカソード周囲も熱せられるため、これによる歪みが生じて高周波特性に影響が現れる可能性も危惧されるが、共振周波数が多少低い方向にシフトする程度で、実際には空洞本体を温度制御しているため全く問題にはならない。次に、空洞本体を昇温して共振周波数や反射特性の変化を観測した。図2は電子銃空洞の温度に対するカソードセルの共振周波数の変化を

hinode@lms.tohoku.ac.jp

プロットしたものである。丸（赤）は室温から昇温していった時のデータ、クロス（青）は逆に温度が下がっていく時のデータである。実線は丸プロットに対して直線フィットした結果を示している。温度の読み取り精度の範囲で、よく線型な振る舞いを示している。また温度を下げた時も良くこの直線に沿っているのがわかる。この間、共振周波数での反射特性も観測しているが、測定精度の範囲で一定な値を示しており、これらのことから、カソード端板と空洞本体の間の接触に不具合は生じていないものと考えている。なお直線フィットより周波数シフトの温度係数は $-49 \text{ kHz} / ^\circ\text{C}$ と得られているが、この値は、銅の熱膨張係数 ($16.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) を用いて一様膨張を仮定して得られる値 $-47 \text{ kHz} / ^\circ\text{C}$ と非常に良く一致している。真空度については、大気開放していた時間が長かったため昇温に伴う真空悪化が大きい、真空リークは生じていない。今後は、熱負荷サイクルに対しての安定性の確認を更に進めていくと共に、高周波源の準備が完了次第、大電力試験を再開する予定となっている。

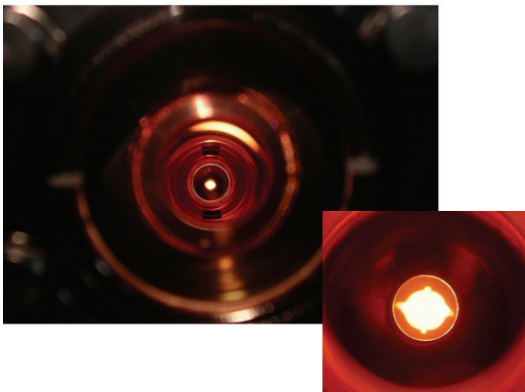


図 1 : ヒーター通電時 (ヒーター電流 = 9 A) のカソードの様子 (カソード温度 = $\sim 1900 \text{ K}$)

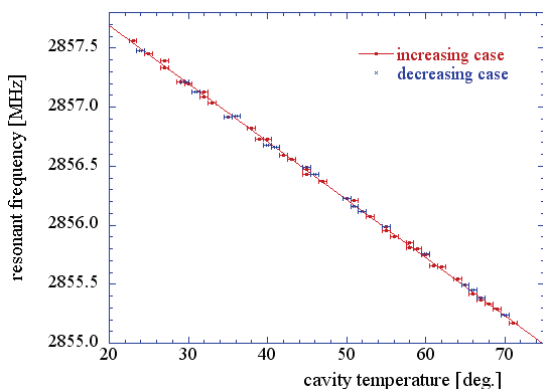


図 2 : カソードセルの共振周波数の温度依存性。丸（赤）プロット：温度が室温から上昇していく時の共振周波数の測定値、クロス（青）プロット：温度が下降していく時のデータ、実線：丸プロットに対する直線フィット。

3. カソードの設置誤差の影響の評価

現状の電子銃に於いては、端板に組み込まれるカソードの製作精度は十分に高いものと考えられており、設置位置の微調機構は特に設けられていない。しかしながら SUPERFISH を用いた評価の結果、ビーム進行方向に僅か 0.1 mm のオフセットが有っただけでもカソード近傍の電場強度に無視できない違いが生じ、結果としてビームに少なからぬ影響を与えることがわかってきた^[4]。図 3 には、GPT コードにより得られた電子銃出口付近での縦方向位相空間分布が示されている。空間電荷効果には SpaceCharge3D ルーティンを用いている。図には、カソード設置に際してビーム進行方向に $\pm 0.1 \text{ mm}$ のオフセットが有った場合の分布とともに示してある。オフセットの符号はビーム進行方向にカソードが突き出した場合が正になっている。カソードがウェネルト面よりも突き出ると、その分だけカソード表面の電場が強くなり、このためバンチ先頭の粒子は早いタイミングで加速セルに到達することになり、その結果より高い加速電圧を受けて、最終的に電子銃出口でのバンチの先頭エネルギーは高い方にシフトしている。現在、t-ACTS における短バンチビーム生成のスキームとしては、アルファ電磁石とシケイン型磁気バンチ圧縮器もしくは加速管による velocity bunching が考えられている^[5]。電子銃出口でのビームの性質の把握・理解はこれらの初期条件とも言えるもので極めて重要である。しかしながら、電子銃内部での空間電荷効果の影響により非常に大きく左右されるため、その正確な評価は容易ではない。殊に ITC RF gun にあつては、比較的自由に位相空間分布を操作できるとはいえ、カソードセルでのエネルギーゲインは 0.3 MeV 以下と低エネルギーのため、一般的な BNL タイプの電子銃に比べて、その影響は特に大きいと予想される。より正確なシミュレーションの開発と共に、位相空間分布の測定も極めて重要なテーマであり、このためのモニターの開発も検討を進めている^[6]。

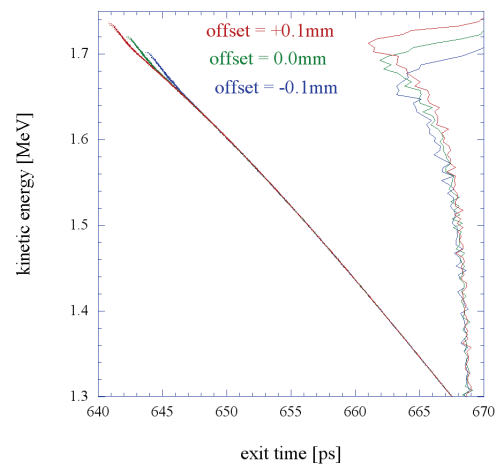


図 3 : 電子銃出口付近での縦方向位相空間分布。

4. 高周波源その他の準備状況

昨年度までにクライストロンとモジュレータの入手が完了し、現在は立体回路の構築を進めながら、これら高周波源の動作試験を進めている。図4は、本年3月に竣工した光源加速器棟に設置作業中の高周波源である。表2と表3にはそれぞれの仕様をまとめてある。プリバンチド FEL への利用を考えて、マクロパルスの有効幅は $3 \mu\text{s}$ 以上となっている。



図4：光源加速器棟に設置作業中の高周波源。
(手前側：パルストランスのタンクに装着されたクライストロン、奥：モジュレータ)。

表2：東芝製クライストロン
(形式：E3730A)

周波数	2856 MHz
出力	50 MW
効率	> 43 %
電圧	317.2 kV
電流	360 A

表3：日新電機製クライストロンモジュレータ
(形式：NKM-317K360THU)

出力パルス電圧	317.2 kV
出力パルス電流	360 A
負荷抵抗	881 Ω
有効パルス幅	> $3 \mu\text{s}$
半値幅	< $7.0 \mu\text{s}$
パルス電圧平坦度	< 0.3 %
パルス電圧安定度	< 0.3 % (10min)
パルス立上り時間	< $1.6 \mu\text{s}$
パルス立下り時間	< $2.0 \mu\text{s}$

クライストロンについては、既に定格でのダイオード試験が終了し、現在はインターロックや制御システムの構築を進めながら、ダミー負荷への大電力出力試験を実施しているところである。図5にはクライストロンの入出力特性の測定結果を示した。所定の性能が得られていることがほぼ確認されている。

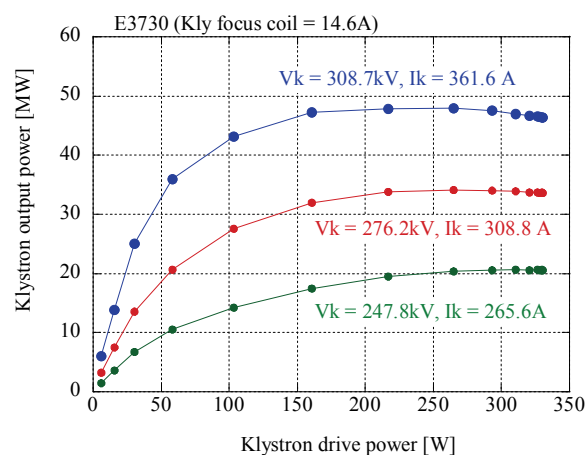


図5：クライストロン入出力特性（暫定データ）。

立体回路の構築に必要なハードウェアは既に入手・手配済みであり、今年中には電子銃単体でのビーム運転を開始する予定となっている。またこの他、THz 用アンジュレータの製作が本年6月に完了し、現在は磁場測定データの解析と詳細な性能評価を進めているところである^[7]。

本開発研究の一部は、文部科学省 科学研究費補助金・基盤研究（S）（#20226003）のもとで実施されている。

参考文献

- [1] H. Hama et al., New J. Phys. 8 (2006) 292., M. Yasuda et al., Proc. of 30th Int. FEL Conf., Gyeongju (2008) 71., F. Hinode et al., Nucl. Instr. and Meth. A (2010), doi:10.1016/j.nima.2010.02.025.
- [2] K. Nanbu et al., Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009, Tokai, (2009) 1020.
- [3] K. Miyamoto, Musashino Engineering Co., Ltd., private communication.
- [4] F. Hinode et al., Proceedings of the first International Particle Accelerator Conference IPAC'10, Kyoto, (2010) TUPEC010.
- [5] F. Miyahara et al., in these proceedings, THLH06.
- [6] H. Hama et al., Proceedings of 14th Beam Instr. Workshop, Santa Fe (2010) TUCNB03.
- [7] Y. Tanaka et al., in these proceedings, THPS067.