

DEFLECTING CAVITY FOR A TEMPORAL RESPONSE MEASUREMENT OF A PHOTOCATHODE

Ryoji Nagai*^{A)}, Masaru Sawamura^{A)}, Nobuyuki Nishimori^{A)}, Ryoichi Hajima^{A)},

^{A)}JAEA, 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

Abstract

Technologies for the next generation light sources based on energy-recovery linac (ERL) are under development in our group. Photocathode related technology is a key technology for the ERL based light sources. Temporal shape control of the photocathode gun generated electron beam is indispensable to generate ultra-small emittance electron beam. A 1300 MHz deflecting cavity has been developed for a temporal shape measurement of an electron beam from a 250-kV DC photocathode electron gun. The cavity is a rectangle shaped TM120 mode with the unloaded quality factor $Q_0 = 17660$. The deflecting angle is ± 9.5 mrad for the electron bunch with ± 50 ps with 134.7 W input RF power.

光陰極時間応答性測定のための偏向空洞

1. はじめに

われわれのグループでは ERL 加速器技術を基盤とした共振器型 X 線自由電子レーザー^[1]、レーザーコンプトンガンマ線源^[2]などの次世代光源の研究を進めている。ERL 型加速器の潜在能力を十分に引き出し、これらの光源を実現するには、負の電気親和力 (NEA) 状態の表面を持つ光陰極を有する電子銃での超低エミッタンス電子ビームの生成が必要不可欠である。NEA 光陰極により超低エミッタンス電子ビームが生成可能であることは熱エミッタンス測定実験^[3]により示されている。しかし、実際に高周波加速器で加速し、超低エミッタンス電子ビームを得るには数十ピコ秒程度のパルス状の電子バンチとして電子銃から引き出す必要がある。

パルス状の電子ビームでは時間軸方向での電荷密度の差により空間電荷力による発散力が不均一に働くことで、エミッタンスの増大を生じる。このエミッタンス増大を抑制するには、電子ビームの時間形状を適切に成形することが有効である^[4]。光陰極を駆動するレーザー光の時間形状成形技術については、いくつかの方法があり^[5]、銅や Cs₂Te 陰極に適用されてきた^[6]。電子ビームの条件や加速器の配置などにより、最適な時間形状は異なるので、実際の加速器に合わせて、時間形状の最適化を行う必要がある。また、銅や Cs₂Te 陰極はピコ秒以下の時間応答特性であるのに対して、代表的な NEA 光陰極である GaAs は時間応答が遅く数十ピコ秒程度であることが知られている^[7]。そのために GaAs 光陰極の時間応答性を改善するための様々な研究がなされている^[8]。

電子バンチの時間形状の最適化や光陰極の時間応答性の改善を進めていくには、電子バンチの時間形状を正確に測定する必要がある。この測定には高周波偏向空洞を用いて電子ビームを断面方向に掃引し、スクリーン上に投影されるプロファイルにより時間形状を観測するというシステムが用いられてきた^[9]。JAEA においても、これまで 500 MHz の同軸型偏向空洞を用いた時間形状測定システムが開発されてきた^[10]が、時間分解能を改善するために、1300 MHz の TM120 モードの偏向空洞を設計・製作し、基本的な特性特性の測定を行った

ので、その結果について報告する。

2. 電子バンチ時間形状計測システム

JAEA において光陰極評価用の電子銃として開発した 250-kV 電子銃^[11]の電子ビーム評価用ビームラインに偏向空洞を組み込んだ電子バンチ時間形状計測システムを図 1 に示す。電子銃は直流高電圧電源、セラミック管などを収納している高電圧タンク、光陰極を調製するためのプリパレーションチャンバ、高電圧を印加して電子ビームを発生するメインチャンバなどで構成されている。ビーム評価用ビームラインの要素としてはエミッタンス補償用のソレノイドレンズ、エミッタンス計測用のスリットとスクリーン、電流値を計測するためのファラデーカップがある。スリットはタングステン製で厚さ 0.1 mm、幅 50 μm である。スクリーンは厚さ 0.1 mm、直径 25.4 mm の YAG:Ce であり、帯電防止のために表面に薄くアルミニウムを蒸着している。図のようにスリットの直後に偏向空洞を配置し、偏向空洞で操印した電子バンチのスクリーン上の像を CCD カメラで観察することで電子バンチ時間形状を計測できる。

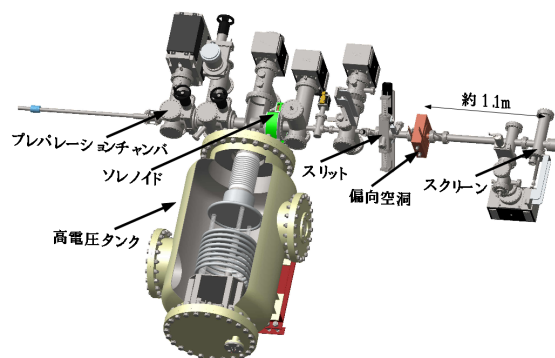


図 1: 電子バンチ時間形状計測システム

偏向空洞からスクリーンまでの距離は約 1.1 m である。例えば、偏向空洞により、100ps を操印して、スク

* nagai.ryoji@jaea.go.jp

リーン上で 20mm にしたとすると、スリットでコリメートした幅 $50\ \mu\text{m}$ は $0.25\ \text{ps}$ に相当する。また、CCD カメラの分解能は 480 ピクセルで約 $25\ \text{mm}$ をみているので、1 ピクセル当たり約 $50\ \mu\text{m}$ となる。一方、偏向空洞の位相にジッタがあると、像が滲み時間分解能を劣化させる。1300 MHz で偏向した場合は位相ジッタ 1 度は約 $2\ \text{ps}$ に相当するが、500 MHz の場合は約 $5.5\ \text{ps}$ に相当する。従って、本システムの時間分解能は偏向空洞の位相ジッタでほぼ決定される。数十ピコ秒の電子パンチの時間形状を計測するにあたり、十分な時間分解能を確保するには 1300 MHz の偏向空洞であれば 1 度程度の位相ジッタまで許容できるが、500 MHz では 0.3 度程度にしなければならない。

3. 偏向空洞の設計および製作

偏向空洞は図 2 に示すような 1300 MHz の TM120 モードの矩形型の偏向空洞を松葉らが製作した空洞^[12]を参考に設計・製作した。この空洞には ICF114 フランジを持つビームポート、半固定型のチューナ、N 型コネクタを持つ入力カップラ、SMA コネクタを持つピックアップカップラ、温調用の銅パイプが付属する。ビームポートの内径は $\phi 38\ \text{mm}$ とした。チューナは空洞側面の薄い壁を押し引きすることで周波数を調整する半固定型である。入力カップラとピックアップカップラは ICF034 フランジに溶接された同軸型フィードスルーを用いており、カップラの結合度を定める中心導体の挿入深度は ICF034 フランジのスペーサで調整する構造となっている。空洞の両端板には $\phi 8\ \text{mm}$ の銅パイプがはんだ付けされており、ここに恒温循環水槽で精密に温調された水を流すことで、空洞の温度を一定に保つ。空洞の材質は無酸素銅 C1020-H であり、ビームパイプ部分での損失を減らすために、ビームパイプ部分まで無酸素銅とした。空洞の本体および ICF フランジとの溶接は、すべて電子ビーム溶接で行った。

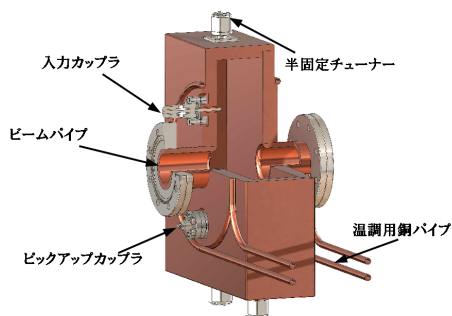


図 2: TM120 モード矩形型偏向空洞

偏向空洞の共振モードを TM120 モード、1300 MHz にするための空洞の形状を MW STUDIO を用いて決定した。矩形の縦横の長さをずらすことで TM 120 モードが得られる。計算の結果から空洞の大きさを縦 260.7 mm、横 240 mm とした。ビームポートのフランジ間隔が 200 mm であるという制限から、空洞の長さは 60 mm とした。MW STUDIO で得られた空洞中心断面の電磁場分布を図 3 に示す。図 3 において上の図は縦方向の電場分布、下の図は横方向の磁場分布をそれぞれ示して

おり、電子パンチはこれらの電磁場で縦方向に偏向される。ただし、それぞれの電場または磁場が最大となる位相での分布である。空洞に入射した電子ビームはこの電磁場により縦方向に操印される。空洞の位置での電子ビームはソレノイドレンズによって直径数 mm 程度以下に収束されるので、電子ビーム通過する範囲の電磁場の分布がほぼ均一であることがこの図から分かる。

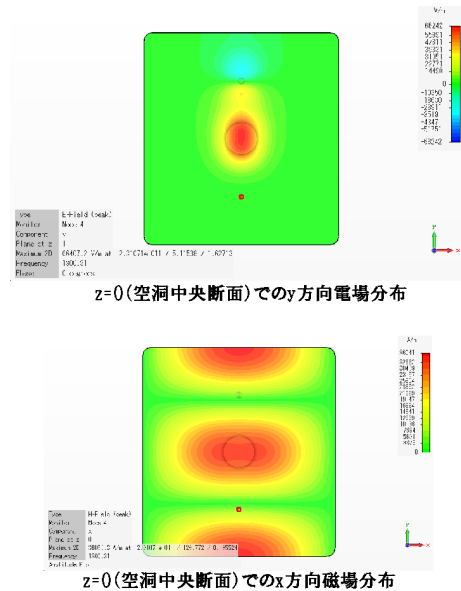


図 3: TM120 モード矩形型偏向空洞内の電磁場分布

それぞれのカップラの中心導体の挿入深度と結合度の関係についても MW STUDIO を用いて求めた。入力カップラとピックアップカップラそれぞれの中心導体の挿入深度と結合度の関係についての計算結果を図 4 に示す。上下それぞれはピックアップカップラと入力カップラについての結果である。ただし、挿入深度は端板内表面から中心導体先端までの距離であり、空洞内に突き出る方向をプラスとした。入力カップラについては結合度を 1 にするために挿入深度を約 5.5 mm、ピックアップカップラについては結合度を -30 dB とするために挿入深度を約 -0.3 mm とした。

4. 偏向空洞の諸特性

製作した空洞の共振周波数、 Q_0 値、および入力カップラの結合度の温度特性を計測した。端板の銅パイプに恒温循環水槽で温調した水を流し、空洞の温度は熱電対で計測した。共振周波数、 Q_0 値、結合度はネットワークアナライザを用いて計測した。その結果を図 5 に示す。共振周波数、 Q_0 値、結合度ともに温度の上昇とともに減少している。これは空洞が熱で膨らむ効果と表面抵抗の上昇によるものである。30 付近の Q_0 値は約 17660 であるが MW STUDIO で求めた結果は 21895 であり、実測値は計算値の 8 割であるので、加工などによる大きな表面抵抗の増加はなかったものと思われる。半固定チューナでの調整範囲および温度を変えた範囲では周波数を 1300 MHz にすることが出来なかった。これは MW STUDIO で空洞の形状を計算した際のメッシュの大きさが十分に小さくなかったことが影響している

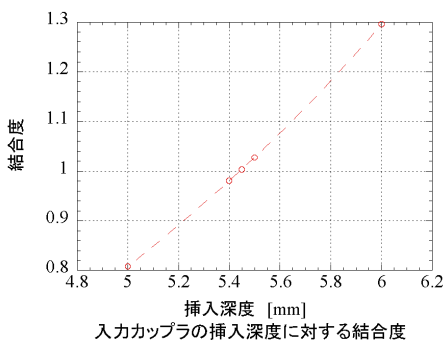
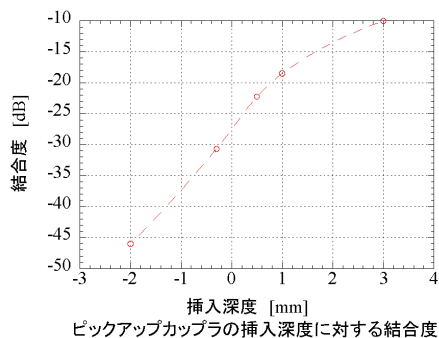


図 4: 中心導体の挿入深度と結合度

ものと思われる。空洞と同期して使用する光陰極の駆動レーザーには Ti:Sapphire を使用する予定である。このモードロックレーザーの繰返し周波数は可変であり、その周波数を 81.34 MHz とするとちょうど 30 付近での周波数の 1/16 となり同期が可能である。

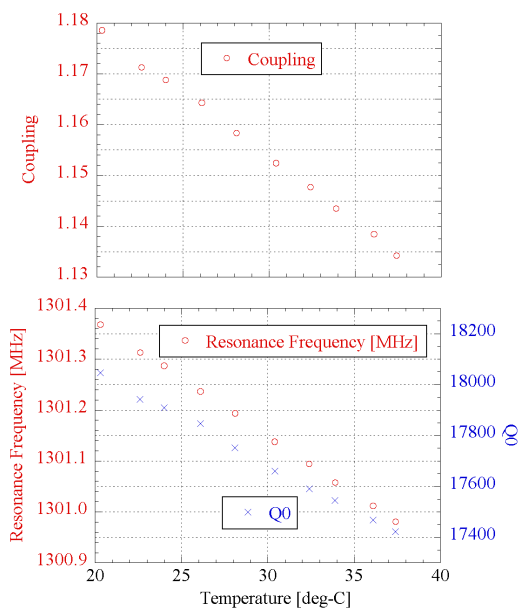


図 5: 偏向空洞の共振周波数、 Q_0 値、および入力カップラの結合度の温度特性

入力を 50W としたときの入射位相に対する偏向角を MW STUDIO で求めた電磁場分布から算出した。その結果を図 6 に示す。最大偏向角は約 15 mrad であり、入

射位相に対して正弦波状に変化する。100 ps の電子バンチを入射してスクリーン上で 20 mm まで広げるには約 ± 9.1 mrad の偏向角を与えればよく、 ± 50 ps は $\pm 23.4^\circ$ に相当するので、図 6 の 90 度を中心に $\pm 23.4^\circ$ で入射すればよい。この入射位相で 9.1 mrad の偏向角を得るために必要な電力は 108.1 W となった。これまで使用していた 500 MHz の同軸型偏向空洞では 75.9W であったので、ほぼ同等の効率が得られている。また、実測した Q_0 値、17660 と入力カップラの結合度、1.152 より求められる実際に必要な電力は 134.7 W である。

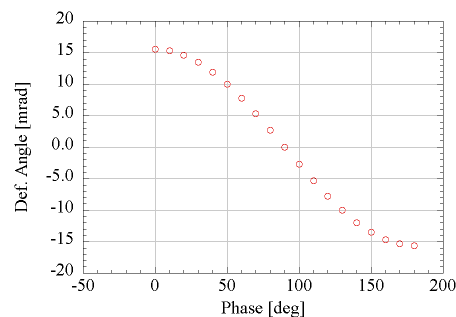


図 6: 偏向角と入射位相

5. まとめ

光陰極電子銃で生成された電子バンチの時間形状を計測するための TM120 モード矩形型 1300 MHz 偏向空洞を設計・製作し基本的な特性特性の測定を行い、電子バンチ時間形状計測システムに用いる偏向空洞として必要な性能を満たしていることを確認した。今後は高出力高周波電力を投入し、位相ジッタなどが十分小さく安定していることなどを確認した後のビームラインに組み込み、電子ビームの測定を行っていく予定である。

参考文献

- [1] R. Hajima and N. Nishimori, Proc. of Part. Acc. Society Meeting 2009, pp. 137–139 (2009). http://www.pasj.jp/web_publish/pasj6/papers/wplsa05.pdf
- [2] R. Hajima et al., J. Nucl. Sci. Tech. 45, pp. 441–451 (2008).
- [3] H. Iijima, et al., Proc. of Part. Acc. Society Meeting 2009, pp. 897–899 (2009). http://www.pasj.jp/web_publish/pasj6/papers/fppsa16.pdf
- [4] I. V. Bazarov and C. K. Sinclair, Phys. Rev. ST Accel. Beams 8, 034202 (2005).
- [5] J. Yang, et al, J. Appl. Phys. 92, 1608-1612 (2002).
- [6] J. Yang, et al, Proc. of EPAC 2002, pp. 1828–1830 (2002).
- [7] P. Hartmann, et al, Journal of Applied Physics, 86, pp. 2245–2249 (1999).
- [8] K. Aulenbacher, et al., J. Appl. Phys. 92, 7536 (2002).
- [9] A. Krycuk et al., Proc. of PAC1993, 939 (1993).
- [10] N. Nishimori, et al., Proc. of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp. 595–597 (2008). http://www.pasj.jp/web_publish/pasj5_lam33/contents/PDF/WP/WP121.pdf
- [11] R. Nagai, et al., Proc. of PAC2009, 545 (1993). <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/PAC2009/papers/mo6rfp075.pdf>
- [12] S. Matsuba, et al., Proc. of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp. 996–998 (2010).