

透過光型スピン偏極電子源の時間応答性評価 (II)

MEASUREMENT OF TEMPORAL RESPONSE OF TRANSMISSION-TYPE SPIN POLARIZED PHOTOCATHODES (II)

稲垣利樹^{#,A)}, 山本尚人^{A)}, 許斐太郎^{B)}, 岡野泰彬^{C)}, 阿達正浩^{D)},

金秀光^{D)}, 保坂将人^{A)}, 高嶋圭史^{A)}, 加藤政博^{B)}

Toshiki Inagaki^{#,A)}, Naoto Yamamoto^{A)}, Taro Konomi^{B)}, Yasuaki Okano^{C)}, Masahiro Adachi^{D)},

Xiuguang Jin^{D)}, Masahito Hosaka^{A)}, Yoshifumi Takashima^{A)}, Masahiro Katoh^{B)}

^{A)} Nagoya University

^{B)} UVSOR Facility, Institute for Molecular Science

^{C)} Laser Research Center for Molecular Science, IMS

^{D)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

We have developed a system to measure temporal response of transmission-type photocathodes using an rf deflecting cavity. The rf cavity, beam profile monitor and laser pulse stretcher have developed and the performances of photocathode were investigated. Now we have measured the temporal response of a transmission-type GaAsP photocathode with 600 nm thickness and obtained a temporal response of 7.8 ps.

1. はじめに

我々は表面に負の電子親和力 (NEA) を持たせた透過光型スピン偏極電子源を開発した。スピン偏極電子ビームは「International Linear Collider^[1]」や「CLIC^[2]」などを実現するために必要不可欠とされている。また現在「Spin-polarized Low Energy Electron Microscope^[3]」や「Pulsed spin TEM^[4]」への応用も期待されている。名古屋大学では GaAs/GaAsP 歪み超格子フォトカソードを用いて 90% を超えるスピン偏極度と $2 \times 10^7 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ の輝度を同時に達成している^[5,6]。

電子源開発の次なる段階として透過光型電子源フォトカソードの時間応答性を評価する必要がある。時間応答性の評価はピコ秒スケールのバンチ長を持つ電子ビームの実現可能性を確かめる上で重要となる。それ故に我々は RF 偏向空洞を用いた時間応答性評価システムを設計、製作した。本システムではレーザーパルス(波長 800 nm、繰り返し周波数 90.1 MHz)と同期した RF 偏向空洞(共振周波数 2612.9 MHz)を用いて電子ビームを進行方向に対し垂直に偏向することによって縦方向の情報を横方向に投影する。その後投影されたビームサイズの測定を行うことで励起レーザーに対する時間応答性を評価する。

2. 高輝度透過光型スピン偏極電子源

透過光型電子源ではフォトカソード背面の極小さな領域のみで電子を励起することにより高輝度な電子ビームを生成することを可能にしている。焦点距離 1.5 mm の収束レンズを用いることで励起レー

ザーは直径数 μm まで絞ることができる。そこで励起された電子は電子銃の電場により引き出される。我々の場合は定格印加電圧 20 kV で、電極間距離は 4 mm となっており、電極間電圧は 5 MV/m となる。

ここで透過光型電子源とは励起レーザー (photon energy: 1.55 eV) に対して透明な Gap 基板 (bandgap energy: 2.26 eV) に GaAs/GaAsP 歪み超格子を活性層として積層させたフォトカソードである。基板に GaAs (bandgap energy: 1.42 eV) を使用した従来の反射型電子源の時間応答性は評価されているが、この透過光型電子源は未だ評価されていない。第 3 節以降では透過光型電子源の時間応答性を評価するために製作、評価を行ったシステムについて紹介する。

3. RF 偏向空洞を用いたバンチ長測定

3.1 原理

この測定方法におけるバンチ長 σ_z は、モニター RF-off の時のビームサイズ σ_{y0} 、RF-on の時のビームサイズ σ_y 、空洞出口からモニターまでの距離 L_s 、空洞内の最大磁束密度 B_0 、ビームが空洞に入射するときの位相 φ 、電子ビームの速度 $v_z (= \beta c)$ 、相対論的な電子のエネルギー $E (= \gamma mc^2)$ などを用いて次の式(1)で求めることができる。バンチ長測定の模式図を Figure 1 に示す^[7]。

$$\sigma_z = \frac{E}{ceL_s B_0 \left\{ \cos \left(\omega \cdot \frac{L_s}{v_z} + \varphi \right) - \cos \varphi \right\}} \sqrt{\sigma_y^2 - \sigma_{y0}^2} \quad (1)$$

[#] inagaki.toshiki@b.mbox.nagoya-u.ac.jp

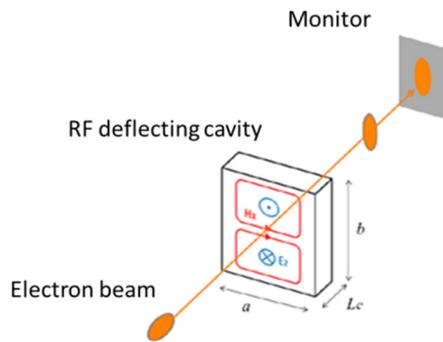


Figure 1: Schematic of the electron bunch length measurement system.

3.2 RF 磁場と電子ビームの同期

RF 磁場を用いて電子ビームのパルス長を測定するためには RF 磁場と電子ビームを精度よく同期する必要があります。このために空胴の共振周波数は電子ビームの繰り返し周波数の整数倍とした。電子ビームの繰り返し周波数はフォトカソード励起用レーザーの繰り返し周波数で決まり、本研究の場合は 90.1 MHz である。空胴の共振周波数は、数 ps~数百 ps のバンチ長測定が可能である 2612.9 MHz を採用した(ビーム繰り返し周波数の 29 倍)。

本研究で構築した同期システムの概要を Figure 2 に示す。

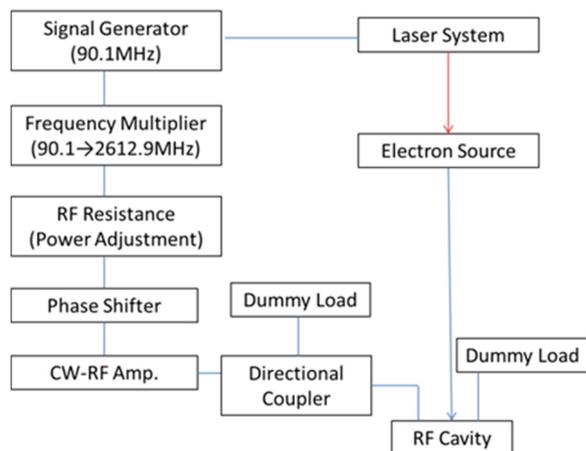


Figure 2: Schematic of the electron bunch length measurement system.

3.3 レーザーシステム

本研究で用いたレーザー発振器はモード同期型 Ti:sapphire レーザー (Mira, Coherent 社) であり、平均出力 700 mW、中心波長 800 nm、バンド幅 13 nm、パルス長 130 fs である。Laser System の模式図を Figure 3 に示す。

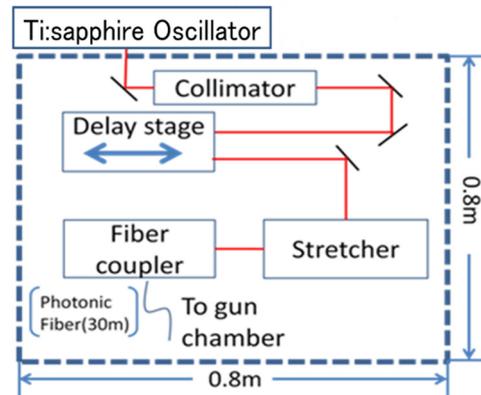


Figure 3: Schematic of the laser system.

図中に示した Delay Stage では、ディレイステージを用いて発振器からフォトカソードまでの光路長を変化させることにより、照射タイミングを制御する。用いたディレイステージは移動範囲 25 mm、位置分解能 0.05 μm であり、生成される電子ビームに対する時間分解能は、要求性能を十分に満たす 0.33 fs である。したがって、先に述べた Phase Shifter と組み合わせることで広い位相調整範囲かつ非常に高い分解能で電子ビームと RF 磁場の位相を合わせる事が可能となる。

レーザー発振器と電子銃は約 30 m 離れて設置されているため、その間の輸送にフォトニック結晶ファイバーを用いた。本研究で用いたフォトニック結晶ファイバーは NKT Photonics 社の LMA-25 である。ファイバーの長さは 30 m、ファイバーの径は中心波長 800 nm の輸送効率から 25 μm に決定した。

フォトニック結晶ファイバーを用いてレーザーを輸送する際には波長分散が生じる。本研究では、以下に述べる Stretcher を用いることで、任意の量の逆向きの波長分散をかけ、パルス長調整が可能なレーザーの照射システムを組み上げた。ここで、波長分散を補償しないときに想定される輸送後のパルス長は、ファイバーの分散曲線から約 41 ps と見積もった。

波長分散の補償は、回折格子を用いて波長に応じた回折角の違いを利用し、Figure 4 に示す Stretcher 内で光路差が生じさせることで行う。補償量は、Figure 4 中の Transvers Retroreflector をステージにより平行移動することで調整する。本研究では、刻線数 1800 grooves/mm の回折格子 (SPECTROGON 社 Grating 番号:715.700.600) を用いることで、およそ 1 ps~20 ps の範囲の任意のパルス性能を持つレーザーの照射を可能とするシステムを組み上げた。

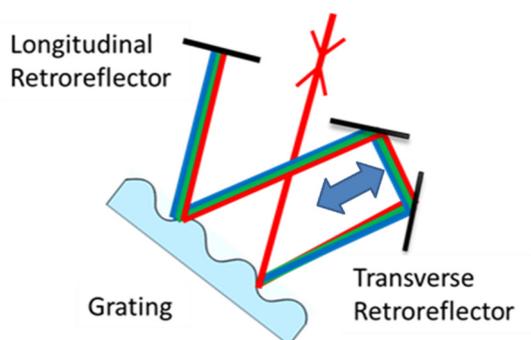


Figure 4: Schematic of the pulse stretcher system.

3.4 RF 偏向空洞

製作した空洞 (Fig. 5) のパラメータを Table 1 に示す。空洞の形状は、空洞内に誘起される近傍モード間の共振周波数間隔が広く、近傍モードからの電子ビームへの影響を少ない直方体とした。直方体空洞内のビーム軌道に横方向の磁場を誘起する電磁場モードで最も低次のモードである TM₁₂₀ モードを採用した^[8]。ビーム軸方向の長さはビームの偏向効率を考慮し、46.81 mm に決定した。この長さは RF の波長とローレンツ因子の積の 1.5 倍である。

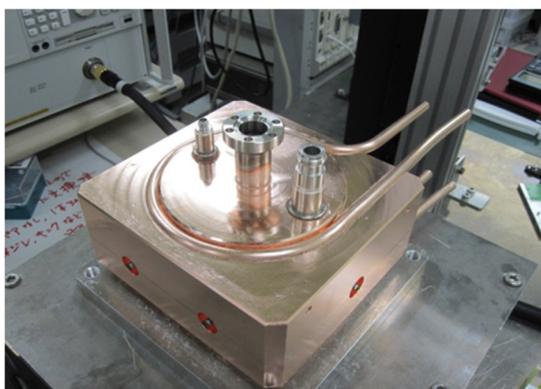


Figure 5: RF deflecting cavity.

Table 1: Parameters of the RF cavity

Width	121.01 mm
Height	129.98 mm
Longitudinal length	46.81 mm
Resonance frequency	2612.9 MHz
Quality factor(loaded)	10,155
Quality factor(unloaded)	20,565
Input coupling factor	1.02
Magnetic field at 1W	1.57 G(max.)

3.5 ビームサイズの測定方法

電子ビームを蛍光板に当てその像を CMOS カメラ (The imaging source, DMK23GM021) で捉えることで電子ビームのサイズを測定する。ビームサイズ測定の様式図を Figure 6 に示す。

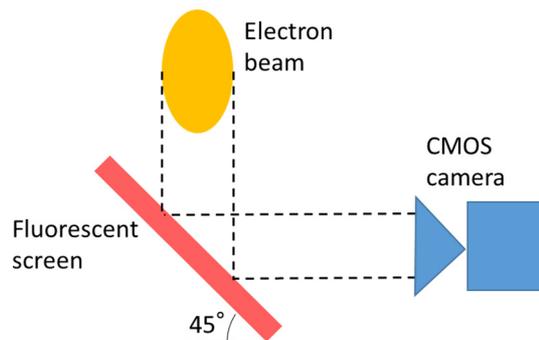


Figure 6: Schematic of the measurement system for the electron beam size.

4. 電子ビーム偏向試験

RF 偏向空洞を直流型 20 keV 電子銃^[9]にインストールした後電子ビームの偏向試験を行った。蛍光板上で電子ビームの拡がりを観察することができ、20 keV の電子ビームを十分偏向できる磁場が誘起されていることを確認した。

さらにパルスレーザーを用いて活性層厚み 600 nm の GaAsP フォトカソードの時間応答性を測定した。その結果、40.5 ps の励起レーザーに対して 48.3 ps の電子ビームが生成されていることを確認した。このレーザーパルス長と電子バンチ長の差分は GaAsP の厚みを考慮すると信頼できる結果である。しかし現段階では初期電子ビームサイズが大きく分解能が低いという問題がある。今後ソレノイドコイルを用いることで電子ビームを絞り、分解能を向上させることを計画している。

5. まとめ

透過光型電子源の時間応答性を評価するためのシステムを完成させた。そのシステムを用いて電子ビーム偏向試験を行い、20 keV 電子ビームを十分偏向する磁場が誘起されることを確認した。さらに活性層厚み 600 nm の GaAsP フォトカソードの時間応答性を測定し、システムが正常に動作することを確認した。

今後ストレッチャーを改良することで 1 ps のレーザーの照射を可能にし、様々なデザインの透過光型電子源の時間応答性を詳細に行っていく予定である。

謝辞

高エネルギー加速器研究機構の高富俊和氏には周

波数調整加工や溶接作業など製作全般に協力して頂き深く感謝致します。また、分子科学研究所装置開発室の青山正樹氏、水谷伸雄氏には空洞を製作して頂き感謝致します。早稲田大学の坂上和之助教には、バンチ長測定原理や空洞の設計、製作について多くの助言を頂きました。感謝致します。

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費基盤研究(C)No.11007344 (財)による助成(代表者 山本尚人)で行った。

参考文献

- [1] International Linear Collider website:
<http://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>.
- [2] Compact Linear Collider website: <http://clic-study.org/accelerator/CLIC-ConceptDesignRep.php>.
- [3] E. Bauer. Low energy electron microscopy. Reports on Progress in Physics, Vol. 57, No. 9, pp. 895-938, 1994.
- [4] M. Kuwahara, F. Ichihashi et al., Journal of Physics: Conference Series 371 (2012) 012004.
- [5] N. Yamamoto, T. Nakanishi et al., J. Appl. Phys. 103 (2008) 064905.
- [6] X.G. Jin, N. Yamamoto et al., Appl. Phys. Ex. 1 (2008) 045002.
- [7] K. Sakaue, et al. "Electron Beam Bunch Length Measurement Using Higher Mode RF Cavity.", Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 20P089, p. 471(2005).
- [8] N. Yamamoto et al, UVSOR activity report, accelerators and light sources, p. 34(2012)
- [9] N. Yamamoto et al., J. Appl. Phys. 102, 024904 (2007).