

## 透過光型スピン偏極電子源の時間応答性評価

### MEASUREMENT OF TEMPORAL RESPONSE OF TRANSMISSION-TYPE

### SPIN-POLARIZED PHOTOCATHODES

稲垣利樹<sup>#, A)</sup>, 梶浦陽平<sup>A)</sup>, 許斐太郎<sup>B)</sup>, 岡野泰彬<sup>C)</sup>, 阿達正浩<sup>D)</sup>,  
山本尚人<sup>A, E)</sup>, 金秀光<sup>F)</sup>, 保坂将人<sup>E)</sup>, 高嶋圭史<sup>A, E)</sup>, 加藤政博<sup>B, E)</sup>

Toshiki Inagaki<sup>#, A)</sup>, Youhei Kajiuura<sup>A)</sup>, Taro Konomi<sup>B)</sup>, Yasuaki Okano<sup>C)</sup>, Masahiro Adachi<sup>D)</sup>,  
Naoto Yamamoto<sup>E)</sup>, Xiuguang Jin<sup>F)</sup>, Masato Hosaka<sup>E)</sup>, Yoshifumi Takashima<sup>A, E)</sup>, Masahiro Katoh<sup>B)</sup>

A) Graduate School of Engineering, Nagoya University

B) UVSOR Facility, Institute for Molecular Science

C) Laser Research Center for Molecular Science, Institute for Molecular Science

D) High Energy Accelerator Research Organization, KEK

E) Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University

F) Institute for Advance Research, Nagoya University

#### Abstract

Spin polarized electron beam is essential for the high energy particle physics experiment "International Linear Collider". In Nagoya University, transmission-type spin-polarized photocathodes, in which the laser light is injected from the back side of the photocathode have been developed. In the development of the electron source, the quantum efficiency of 0.5 % and the polarization of ~90 % were achieved. However, the response time of the transmission-type electron source is not evaluated. We are planning to measure the response time by using a RF deflecting cavity. In this paper, the details of the measurement system are reported.

#### 1. はじめに

スピン偏極電子ビームは次世代の高エネルギー素粒子実験「国際リニアコライダー」を実現するための必須要素とされている。このスピン偏極電子源開発において名古屋大学では90%を超えるスピン偏極度と0.5%の量子効率を同時に達成している<sup>[1][2]</sup>。

近年、我々は歪み補償型の超格子フォトカソードによりスピン偏極度を維持したまま活性層（超格子層）の厚さを数倍に増加させる事に成功している<sup>[4]</sup>。活性層の厚さの増加は量子効率の向上に非常に有効であるが、デメリットとしてパルス応答性を劣化させる可能性がある。我々は歪み補償型超格子フォトカソードを用いて量子効率を現状の数倍に向上させることを計画しているが、そのためにはパルス応答性の評価が不可欠である。

このため、我々は20 kV 電子源を用いたパルス応答性測定システムを開発した。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 偏向空胴(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蹴ることによって縦方向の情報を横方向に投影し、その後ナイフエッジ法を用いて投影されたビームサイズの測定を行い、励起レーザーに対する時間応答性を評価する。

本発表では、時間応答性評価のためのシステムの

詳細について報告する。

#### 2. 歪み補償型超格子フォトカソード

透過光型のフォトカソードは、超格子層の電子を励起するために必要な 700 nm 以上の波長を持つレーザーに対してはほぼ完全に透明な GaP 基板にバッファ層、超格子層、表面層を成長させた構造を持つ<sup>[3]</sup>。

従来の歪み超格子型は、GaAsP バッファ層に GaAs-GaAsP を交互に成長させた構造であり、格子定数の違いから GaAs のみが歪む。これでは活性層の厚さが増加した場合に、歪みが蓄積して緩和が起り、スピン偏極度が低下してしまう。

一方、歪み補償型のフォトカソードでは、バッファ層に GaAs と GaAsP のほぼ中間の格子定数を持つ AlGaAsP を用いており超格子層の GaAs と GaAsP は互いに逆方向の歪みを受けるため、あたかも全体としては歪んでいないような構造を可能とする (Figure 1)。これにより偏極度を低下させることなく活性層の厚さを増加させる事ができる。現在では、偏極度を低下させることなく 36 層までの超格子層を積層させることに成功している<sup>[4]</sup>。

第 3 節以下では、活性層の厚さの増加によるパルス応答性を評価するために、活性層の厚みや基板とバッファ層の間の中間層が異なる GaAs/GaAsP 歪み超格子、GaAs/GaAsP 歪み補償型超格子のパルス応答性を測定、評価するためのシステムを紹介する。

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

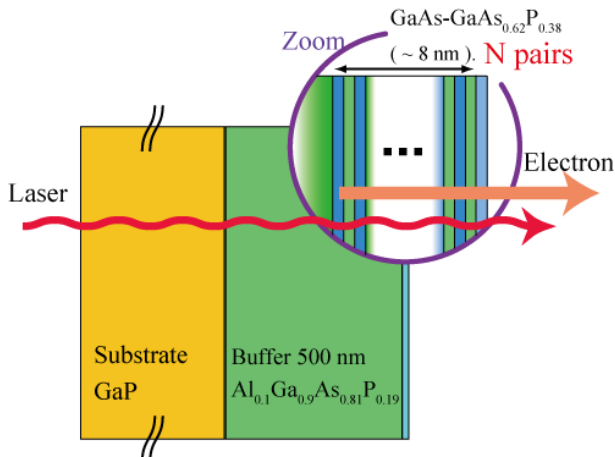


Figure 1: The structure of GaAs/GaAsP strain-compensated superlattice photocathode.

### 3. RF 偏向空洞を用いたバンチ長測定

#### 3.1 RF 偏向空洞を用いたバンチ長測定の原理

透過光型電子源のパルス性能を評価するためにRF 偏向空洞を用いたバンチ長測定システムを開発することにした。この測定方法は、高周波空洞内に、共振現象で誘起した電磁場で、電子ビームを横方向にキックし、時間方向の情報を空間情報に変換する方法である。キックされた電子ビームの空間プロファイルを測定することでバンチ長を求めることが可能である。バンチ長測定の模式図をFigure 2に示す。

このバンチ長測定でバンチ長 $\sigma_z$ は、モニターのRF-offの時のビームサイズ $\sigma_{y0}$ 、RF-onの時のビームサイズ $\sigma_y$ 、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 $\varphi$ 、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<sup>[5]</sup>。

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

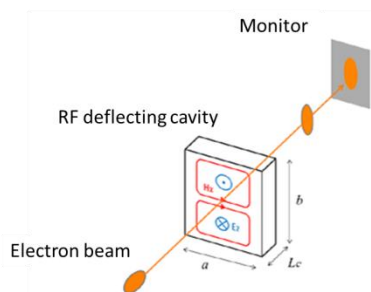


Figure 2: The principle of measuring bunch length.

#### 3.2 ビームサイズの測定方法

本測定において電子ビームのエネルギーは 20 keV であるため、フォトカソードのパルス応答性を測定するためには電荷量を抑え電子ビームの空間電荷効果を抑えなければならない。このため蛍光板などを

用いたビームサイズ測定は困難となる。そこで、ビームサイズの測定にはナイフエッジ法を採用した。

ナイフエッジ法の概略図を Figure 3 に示す。ナイフエッジ法とは、金属板で完全にビームを遮った状態から金属板を徐々にビーム軌道からずらしていき、その下流にあるファラデーカップで電荷量の変化を測定することでビーム径を求める方法である。この手法を用いると精度よく電子ビームサイズを測定することが可能であるが、系の安定度が非常に重要となる。本測定は直流型電子源を用いているため、安定な測定が期待できる。

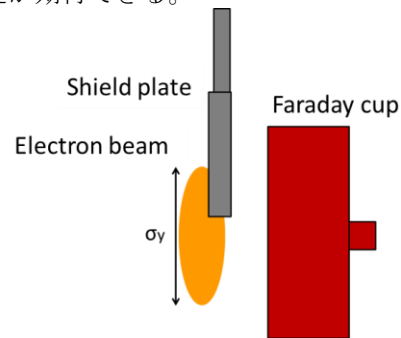


Figure 3: Schematic of the knife-edge.

#### 3.3 RF 磁場と電子ビームの同期について

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これらを精度よく同期する必要がある。このために空洞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で決まり、本研究の場合は 90.1 MHz である。空洞の共振周波数は、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)<sup>[6]</sup>。

本研究で構築した同期システムの概要を Figure 4 に示す。

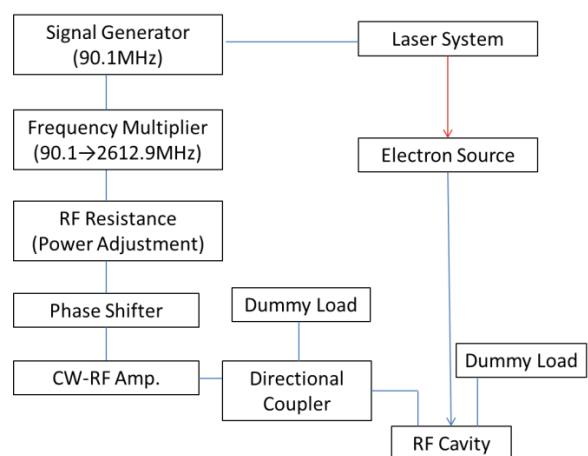


Figure 4: Synchronization System.

レーザーパルスは Signal Generator が発信する 90.1 MHz の信号に同期し出力される。RF 系回路に Phase Shifter を組むことで、空洞内に誘起される RF 磁場の位相と電子ビームのタイミングの同期をとる。RF

電力は Signal Generator が発信する 90.1MHz の信号を位相同期回路 (PLL 回路) で同期した周波数通倍器を用いて空胴の共振周波数である 2612.9MHz と同期し出力、その信号を最大 40 W の CW-RF アンプを介して空胴に供給する。

RF 信号とパルスレーザーをフォトダイオードで取り込んで得た信号の時間差ジッターは、帯域幅 4 GHz のオシロスコープ (Teledyne LeCroy 社 WaveRunner 640Zi) とフォトダイオード (Electro-Optics Technology 社 ET-2030) を用いて少なくとも 32.6 ps 以下であることを確認している。

### 3.4 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。

下の Figure 5 に Figure 4 中の Laser System の全体図を示す。

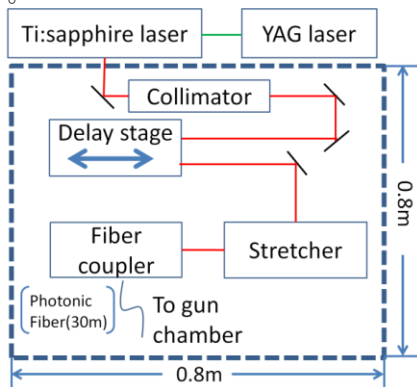


Figure 5: General view of Laser System.

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  $\mu\text{m}$  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ことが可能となる。

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  $\mu\text{m}$  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<sup>[7]</sup>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 6 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 6 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 1500 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 7 に実際の Stretcher の写真を示す。

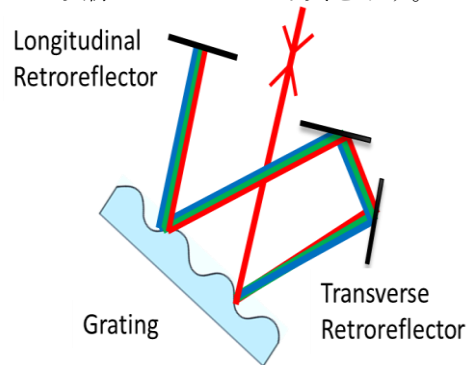


Figure 6: Schematic of the stretcher.

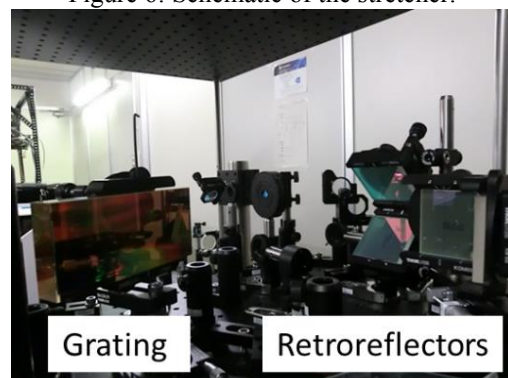


Figure 7: Stretcher.

### 3.5 RF 偏向空胴

空胴の形状は、空胴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。直方体空胴内のビーム軌道上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 TM<sub>120</sub> モードを採用した。

空胴の辺の長さなどの基本的なパラメータはマックスウェル方程式から解析的に算出し、誘起される電磁場や RF 入力ポートとモニターポートの形状、Q 値などの 3 次元の詳細設計、基本的なパラメータの確認は Ansoft 社の 3 次元電磁場解析ソフト HFSS (High Frequency Structure Simulator) を用いた。

これらの設計を元に、自然科学研究機構分子科学研究所装置開発室で粗加工を行い、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 機械工学センターで調整加工し、製作を行った。空胴の材料には、Q 値、真空、入力パワーを考慮して無酸素銅を採用した。

次に製作した空洞の周波数調整機構について述べる。空洞には周波数調整用のチューナーを合計 6 本取り付けた (Figure 8)。チューナーは TM120 モードにおいて空洞内に誘起される電場の分布を考慮し、電場の腹の部分に対応するよう配置した。電場分布に合わせ空洞を変形させることで効果的に共振周波数を変化させることが可能であると考えたからである。このチューナーを用いて空洞をわずかに変形させることで共振周波数を変化させることができる。

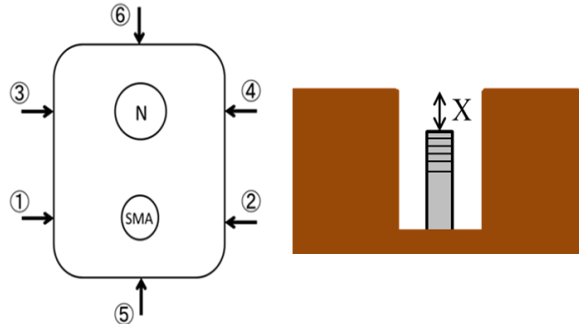


Figure 8: Tuner and its positions.

空洞の製作完了後、共振周波数変化とチューナーの頭と空洞の外壁との距離 (Figure 8 中の X) を測定し、チューナーによる周波数調整可能範囲を見積もった。その結果を Table 1 に示す。Table 1 は、Figure 8 中のチューナーをその番号順に X を変化させて、共振周波数を約 20 kHz 変化させたときの X の変化量 ( $\Delta X$ ) を表している。

Table 1: Adjustment test result of the resonance frequency.

チューナー位置	試験前の周波数(MHz)	試験後の周波数(MHz)	周波数変化(kHz)	$\Delta X$ (mm)
①	2614.240	2614.220	20	0.17
②	2614.217	2614.197	20	0.175
③	2614.195	2614.175	20	0.15
④	2614.171	2614.151	20	0.15
⑤	2614.149	2614.129	20	0.035
⑥	2614.128	2614.106	22	0.05

チューナーは 1 本あたり最大 X を 2 mm まで変化させることが可能である。したがって、6 本のチューナーにより共振周波数を合計約 2900 kHz 下げることができる。

次にビーズ摂動法により測定した空洞のビーム軌道上の磁場分布を Figure 9 に示す。測定は、市販の釣り糸に直径 3 mm の真鍮の球を取り付け、2 mm 刻みで釣り糸を Figure 11 の矢印が示すように動かし行った。この結果により、HFSS で計算した TM120 モードの空洞のビーム軌道上の磁場分布 (Figure 10) とほぼ同じ分布であることが確認された。

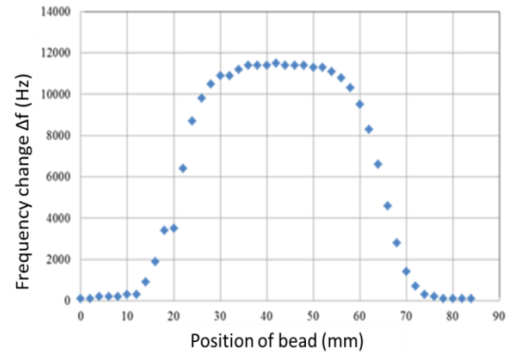


Figure 9: Result of a measurement by the bead perturbation method.

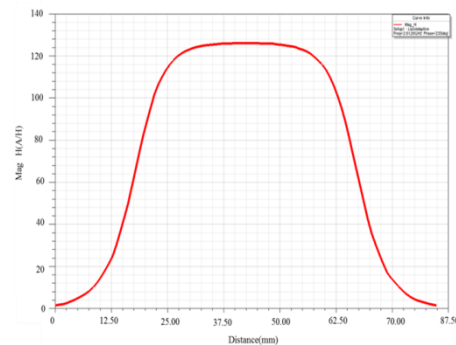


Figure 10: Result of a measurement by HFSS.

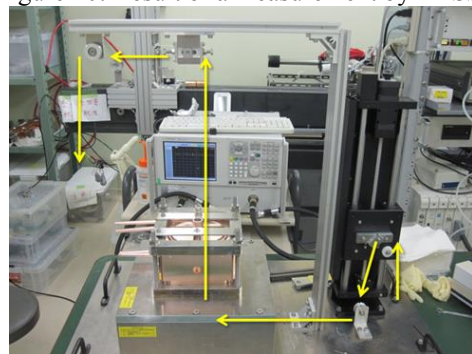


Figure 11: The bead perturbation method.

空洞の設計値と最終的に得られた空洞パラメータを Table 2 に示す。各結合定数や Q 値はほぼ設計値通りであることが確認できた。共振周波数は目標周波数よりも 1.2 MHz ずれているが、Signal Generator の発信する信号の周波数を 90.14 MHz とすることにより製作した空洞のパラメータ (2614.1 MHz) に合わせることにした。これは実験の結果、Signal Generator によりレーザー装置に影響を与えることなく RF 信号とレーザーの周波数を変えられることが確かめられたからである。ここで 90.14 MHz は位相同期回路 (PLL 回路) の許容誤差範囲内である。

製作が完了した後、空洞を電子銃下流約 45 cm の位置に接続し真空テストを行った。約 150 度のベッキングの結果、電子銃直下流部において  $10^{-9}$  Pa 台の真空度、空洞下流部においても  $10^{-8}$  Pa 台の真空度を達成しており、電子銃の運転において十分な真空度が得られることを確認した。Figure 12 には空洞が接

続された電子銃の全体写真を示す。

また実際に 20 keV 連続電子ビームと空洞を用いてビーム偏向試験を行った。その結果、製作した空洞は 20 keV 電子ビームを偏向するのに十分な性能を有していることが確認できた。

Table 2: Design value and final characteristic parameters.

設計値	
共振周波数 (MHz)	2612.9
入力ポート結合定数 $\beta_1$	1.02
モニターポート結合定数 $\beta_2$	0.002
$Q_L$ 値	10582
$Q_0$ 値	21385
最終的なパラメータ	
共振周波数 (MHz)	2614.1
入力ポート結合定数 $\beta_1$	1.02
モニターポート結合定数 $\beta_2$	0.003
$Q_L$ 値	10155
$Q_0$ 値	20565

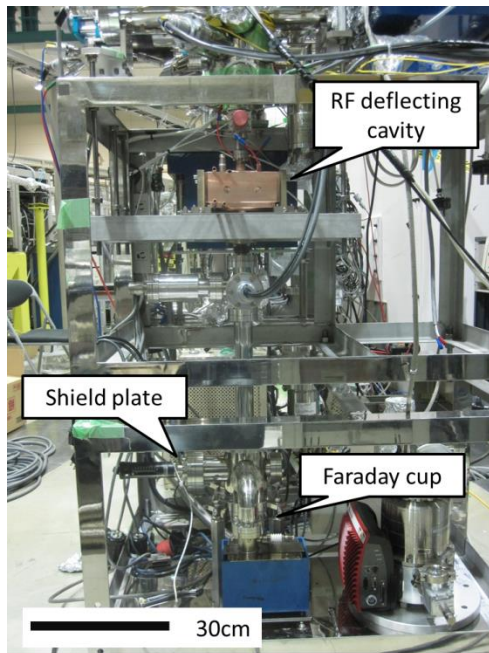


Figure 12: General view of Electron Gun

## 4. まとめと今後

### 4.1 まとめ

本研究では、RF 偏向空洞を用いたバンチ長測定システムを構築した。

RF 偏向空洞の共振周波数は 2614.1 MHz であり、TM<sub>120</sub> モードでビーム軌道上に磁場を誘起する。また、電子励起用パルスレーザーは Signal Generator の 90.14 MHz で発振させる信号と同期している。さらにストレッチャーにより、およそ 1 ps~20 ps の範囲でパルス長が任意に調整可能なレーザー照射システムを組み上げた。

空洞に加えて 3.2 節で述べた空洞下流のビームサイズの測定系もインストールを完了している。

### 4.2 今後

ストリークカメラを用いてレーザーパルス長を測定し、ストレッチャーの性能を確かめる。

システムが正常に働くことを確認した後、活性層厚みや基板とバッファ層の間の中間層が異なる GaAs/GaAsP 歪み超格子、超格子構造に AlGaAsP の中間層を持つ GaAs/GaAsP 歪み補償型超格子のスパイン偏極電子源のパルス応答性を測定、評価していく予定である。

## 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] T. Nakanishi, The XXI International LINAC Conference(1998)
- [2] Xiuguang Jin, Institute for Advanced Research, Nagoya University, Japanese Journal of Applied Physics 51 (2012) 108004, "Fourfold Increase in Quantum in Highly Spin-Polarized transmission-Type photocathode"
- [3] 山本尚人, 名古屋大学大学院理学研究科 2007 年博士論文 "NEA-GaAs 型超格子薄膜結晶を用いた高輝度・高スピン偏極度・大電流密度ビームを生成する電子源の開発"
- [4] Xiuguang Jin, Institute for Advanced Research, Nagoya University, Applied Physics Express 6 (2013) 015801, "High-Performance Spin-Polarized Photocathodes Using a GaAs/GaAsP Strain-Compensated Superlattice"
- [5] Kazuyuki Sakaue, et al "Electron Beam Bunch Length Measurement Using Higher Mode RF Cavity" [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2\\_lam30/Proceedings/20P089.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2_lam30/Proceedings/20P089.pdf)
- [6] 丹羽貴弘, 名古屋大学大学院工学研究科平成 24 年修士論文 "透過光スピン偏極電子源のためのバンチ長測定システムの開発"
- [7] NKT Photonics 社, LMA-25, Single-Mode 25  $\mu$  m Core Fiber, Dispersion Curve