

# DEVELOPMENT OF AN ELECTRON BEAM BUNCH LENGTH MEASUREMENT SYSTEM FOR THE TRANSMISSION-TYPE POLARIZED ELECTRON SOURCE

Takahiro Niwa <sup>#,A,B)</sup>, Naoto Yamamoto <sup>C)</sup>, Masato Hosaka <sup>C)</sup>, Atsushi Mano <sup>C)</sup>, Yoshifumi Takashima <sup>A,C)</sup>, Taro Konomi <sup>B)</sup>, Masahiro Adachi <sup>C)</sup>, Masahiro Katoh <sup>B)</sup>, Kazuyuki Sakaue <sup>D)</sup>, Toshikazu Takatomi <sup>E)</sup>

<sup>A)</sup> Graduate School of Engineering, Nagoya University,  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-8603

<sup>B)</sup> UVSOR Facility, Institute for Molecular Science,  
38, Nishigounaka, Myodaiji-cho, Okazaki, Aichi, 444-8585

<sup>C)</sup> Nagoya University Synchrotron Radiation Research Center,  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-8603

<sup>D)</sup> Research Institute for Science and Engineering, Waseda University (RISE),  
3-4-1, Okubo, Shinjuku, Tokyo, 169-8555

<sup>E)</sup> High Energy Accelerator Research Organization,  
Oho Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

## Abstract

Recently, in order to produce a high brightness electron beam, a transmission type electron source, in which is direction of the laser light is injected from the back side of the photocathode was developed. In the development of the source, the high beam brightness of  $\sim 2 \times 10^7 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$  was obtained and the polarization of  $\sim 90\%$  was achieved. However, the response time of the transmission type electron source is not evaluated. To evaluate the response time, we are developing an electron beam bunch length measurement system using a RF deflecting cavity. We designed a RF deflecting cavity which operates in TM120 mode with 2612.9MHz. In the design of RF cavity, a simulation tool for 3-D full-wave electromagnetic field HFSS was used and it is confirmed that obtained magnetic field is sufficiently high for the measurement with bunch length of a few picosecond.

## 透過光型スピン偏極電子源のための 電子ビームバンチ長測定システムの開発

### 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電子ビームの生成に成功した<sup>[1]</sup>。

近年では従来型偏極電子源の高輝度化をめざし、励起レーザーをビームが生成するのと反対側から入射する背面透過光型スピン偏極電子源の開発を行った。この電子源の開発で高いビーム輝度を達成し、さらに電子源設計の自由度上げることにつながった。また、スピン偏極度としても従来型と遜色のない 90% を達成することに成功した。この背面透過光型電子源は既に電子顕微鏡へ応用され、有用性も確かめられている<sup>[2]</sup>。

この電子源を高エネルギー素粒子実験に用いるにはピコ秒スケールのパルス性能を達成する必要がある。しかし、電子ビーム生成時に実現可能なバンチ

長や励起レーザーに対する時間応答性は未だ評価されてない。

その評価をするためにRF偏向空洞を用いた電子ビームバンチ長計測システムを構築することにし、空洞の設計を行った。

本発表では透過光型電子源の優れた性能を紹介すると共に、RF 偏向空洞の設計について報告する。

### 2. 透過光型スピン偏極電子源

従来型は電子ビーム生成側からレーザーを照射してビームを取り出す反射型である。この場合、焦点までの距離を長くせざるを得ず、レーザーを絞ることが困難である。一方、透過光型は電子ビーム生成の反対側からレーザーを照射し電子ビームを取り出す。透過光型にすることで光学系をフォトカソードのすぐ近くに置くことができ、レーザーを小さく絞ることができるため従来型を大きく上回る輝度が達成できる。また電子ビーム生成側に光学系を置かないため電子銃の設計の自由度も高めることができる。

<sup>#</sup> niwa.takahiro@b.mbox.nagoya-u.ac.jp

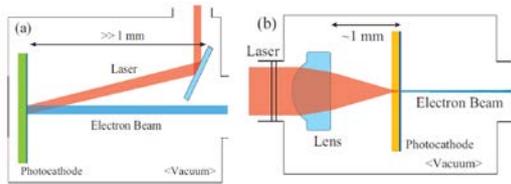


図 1：反射型 (a) と透過光型 (b) の構造

透過光型にするためにはフォトカソードのデザインを変更する必要もあった。従来型では基板が GaAs だったが、エネルギーギャップがレーザーエネルギーよりも大きい GaP に基板を変更することでレーザーの透過を可能にした。

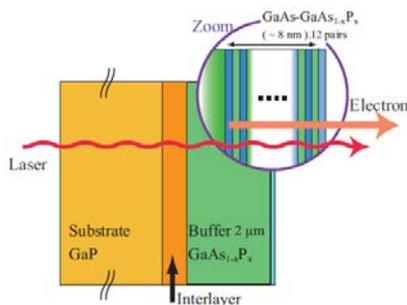


図 2：透過光型のフォトカソード

透過光型 20 kV 高輝度電子銃の概略図を図 3 に示す。カソード電極から約 1 mm の距離に集束レンズを設置することで、極小ビームをつくることができる。また、電子ビーム径を数ミクロンまでしぼることができるので、アノード電極の直径を 1 mm にして、電子銃チャンバーとアノード下流を真真空に切り離すことができ、実効的な差動排気チャンバーとなるため、ビーム生成中においてもフォトカソード周辺の真空を  $10^{-9}$  Pa に保つことができる。

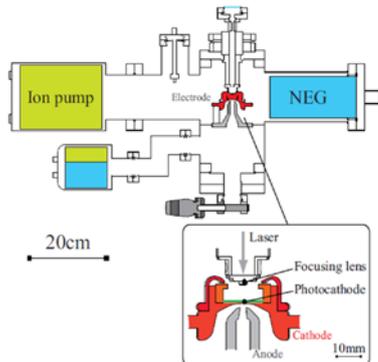


図 3：20kV 高輝度電子銃

### 3. RF 偏向空洞を用いたバンチ長測定

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の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できる方法である。キックされた電子ビームのプロファ

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。バンチ長測定の方法を図 4 に示す。

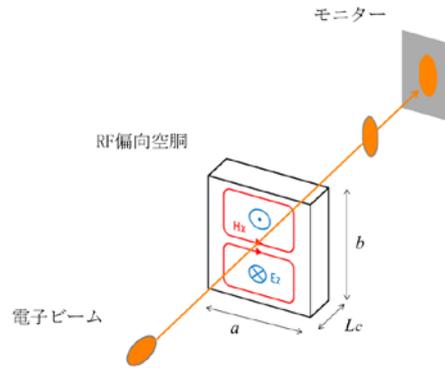


図 4：バンチ長測定原理図

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  $\phi$ 、電子ビームの速度  $v_z (= \beta c)$  などを用いて次式で求めることができる<sup>[3]</sup>。

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

### 4. RF 偏向空洞の設計

ビームバンチ長計測システムを構築するために RF 偏向空洞の設計を行った。空洞の形状は直方体空洞にした。共振モードをビームの繰り返し周波数である 90.1 MHz の 29 倍となる 2612.9 MHz を選び、磁場を空洞の中心に発生させる TM<sub>120</sub> モードを誘起するように設計を行った。

#### 4.1 2 辺の長さ a, b

TM<sub>120</sub> モードの共振周波数  $f$  は、理想的な直方体空洞の場合

$$f = c \sqrt{\left(\frac{1}{2a}\right)^2 + \left(\frac{2}{2b}\right)^2}$$

となり、 $a, b$  の 2 辺の組み合わせから決定できる。この 2 辺の決定にはまず  $Q_0$  値を考えた。入力パワーが

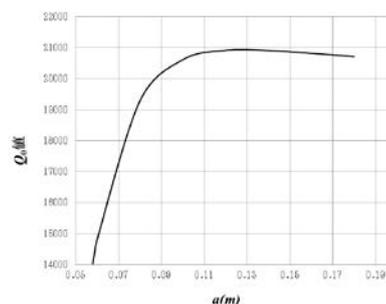


図 5：a 辺と  $Q_0$  との関係

一定ならば、適当に入力カプラの結合を調整することで、 $Q_0$ 値が高いほど高いパワーが得られる。 $a$ 辺と $Q_0$ 値の関係は図5のようになる。

$Q_0$ 値は空洞形状が正方形のときに最大値となるが、多少形状が変わっても差はほとんどない。正方形の場合TM120モードとTM210モードが縮退してしまうため、これを解くために長方形にする必要がある。また、他のモードの共振周波数が近いとビームに他のモードから力が加わるだけでなく、モード間の干渉により位相歪を生じてしまうため、これも考慮して $a, b$ 長さを決定する必要がある。空洞にビームポート、RF入力アンテナ、モニターアンテナを取り付けると周波数が変化してしまうため、 $a, b$ の長さの決定は電磁場計算ソフトHFSS<sup>[4]</sup>で計算し行った。

#### 4.2 ビーム軸方向の長さ $L_c$ について

ビーム軸方向の長さ  $L_c$  は周波数とは関係なく決めることができるため、ビームが磁場から受ける力を考える。ビームが受ける力が最大になるのは空洞を入った時の位相と空洞を出るときの位相差が(奇数)  $\times \pi$  の時である。よって  $L_c$  を RF の波長  $\lambda$  と  $\beta$  を使って次式から決定することができる。

$$L_c = \frac{(2m+1)}{2} \cdot \beta \cdot \lambda$$

電子ビームのエネルギーは 20keV であるため  $\beta = 0.272$  である。 $m=0$  のときつまり  $L_c$  が RF 波長の半波長分のとき  $L_c = 15.64 \text{ mm}$  ,  $m=1$  のときつまり  $L_c$  が RF の波長の 1.5 波長分のとき  $L_c = 46.81 \text{ mm}$  となる。 $L_c = 15.64 \text{ mm}$  だとチューナーの取り付けが難しい。また  $L_c = 46.81 \text{ mm}$  の方が  $L_c = 15.64 \text{ mm}$  より  $Q_0$  値が約 2 倍大きくとれるため  $L_c$  は 46.81 mm に決定した。

### 5. HFSS による詳細な設計

詳細な設計を行うために Ansoft 社の 3次元電磁場解析ソフト HFSS (High Frequency Structure Simulator)<sup>[4]</sup> を用いた。このソフトを使い、ポートのついた空洞の固有モードや  $Q$  値・共振周波数、 $S$  パラメータを計算し、設計を行った。

透過型電子銃は励起レーザーを絞ることが可能であり、高輝度電子ビームを生成するため、ビームポート径は小さくすることができる。ビームポートを小さくすると、ビームポートへ侵入する電磁場が少なくなるため、 $Q$  値・空洞中心磁場を大きくすることができる。ビームポートの径は  $\phi 16 \text{ mm}$  にし空洞の中心に取り付ける。

RF 入出力ポートは、入力用ポートとモニター用ポートの 2つのポートを設ける。空洞を励振させるには、伝送させるモードの電界あるいは磁界の一部と励振の電界あるいは磁界が一致させればよい。今回は TM120モードの電界とアンテナプローブからの電界を一致させ励振させることにした。RF 入力用には N 端子、モニター用は低出力を扱うため SMA 端

子にした。

図6に HFSS に入力した形状を示す。エンドミルで加工すると仮定して空洞の角の部分は半径 10 mm で丸めた。また、ポートと空洞の接合部分の角は放電を抑えるため 0.5 mm の面取りを行った。

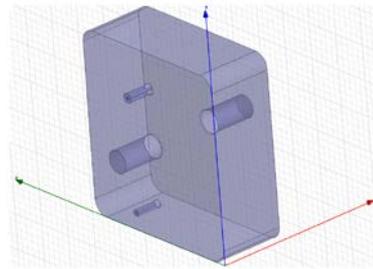


図6：HFSSに入力した形状

HFSS の Solution Type を Driven Modal で計算をし、固有モードの周波数やカップリングを評価しながらポートの位置、アンテナの長さ、直方体の辺の長さなどを微調整した。境界条件は銅に指定し計算を行った。

#### 5.1 RF 入出力ポート

RF 入出力ポートの位置は電場が最大の位置に設置すれば結合効率は最大になるが、 $Q$  値を落とすことになるため位置はビームポートに対して少し外側にずらした方がいい。実際に電場が最大の位置(ビームポートから 32.5 mm)に取り付けた場合とビームポートから 40 mm に取り付けると場合では外側にずらした方が  $Q$  値は約 1000 高かったため、RF 入出力ポート位置はビームポートから 40 mm の位置にした。

入力ポートは、直径 2.4 mm のアンテナが直径 7 mm の穴から空洞内部に突き出す格好になっている。アンテナの空洞内部への突出し量(空洞壁面からの距離)は  $Q_{ext}$  と  $Q_0$  と一致させて  $\beta = 1$  になるように調整するのが最適である。 $\beta$  はポートの  $S$  パラメータから計算し求めることができる。調整を行った結果突出し量 1.6 mm のとき  $\beta_1 = 1.04$  になり、この突出し量に決定した。このとき入力ポートの  $S_{11}$  パラメータを図7に示す。

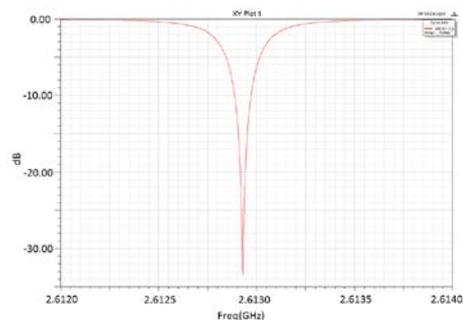


図7： $S_{11}$ パラメータ

モニターポートは、直径1.6 mmのアンテナが直径4.8 mmの穴に突き出す格好になっている。モニターポートの  $\beta$  は小さい方が望ましいため、アンテナの長さは空胴内部に突き出さず空胴壁面より引っ込めたほうがよい。空胴壁面からの引っ込み量を1.4 mmのとき  $\beta_2 = 0.002$  となった。このときのS22パラメータを図8に示す。

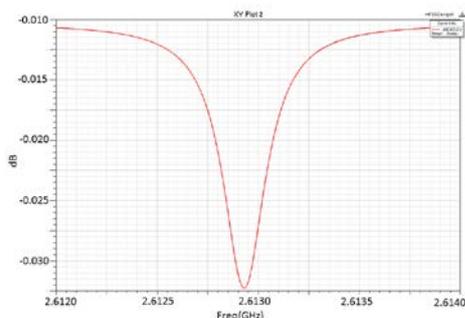


図8：S22パラメータ

$\beta_2$ の値は小さいがS12パラメータで透過パワーを見ると-25.8 dBであった。これはモニターで十分検出できる量である。そのため引っ込み量1.4 mmに決定した。

## 5.2 周波数調整

空胴の周波数変化は理論式から  $a$  辺の長さ 10  $\mu\text{m}$  変化で約 50 kHz 変化、 $b$  辺の長さ 10  $\mu\text{m}$  変化で約 160 kHz の変化となり、HFSS の計算でもほぼ同じになった。これを基準にし、2612.9 MHz で TM120 モードの電磁場を誘起するように  $a$  辺、 $b$  辺の長さ調整し、周波数の合わせこみを行った。

調整した結果  $a = 121.01 \text{ mm}$ 、 $b = 129.98 \text{ mm}$  のとき周波数を合わせることができた。このときのS12パラメータ図9に、空胴内中心のy方向の電場分布を図10に、磁場分布を図11に示す。この結果から2612.9 MHzでTM120モードの電磁場が誘起されていることがわかる。S12パラメータから負荷時のQ値 ( $Q_L$ ) を求めると  $Q_L = 10327$  となった。この値とカップリング  $\beta$  から  $Q_0$  を求めると  $Q_0 = 21087$  となり、理論値とほぼ同じ値となった。

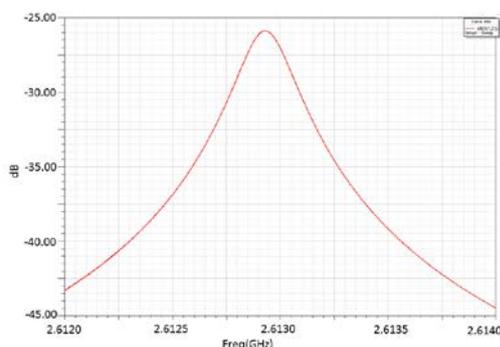


図9：S12パラメータ

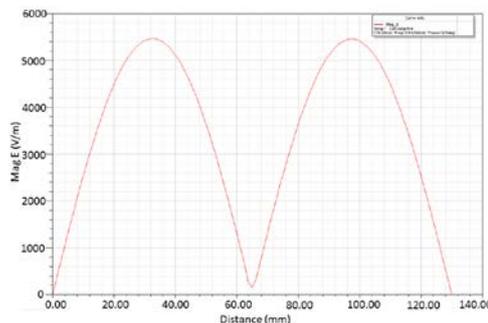


図10：空胴中心のy方向電場分布

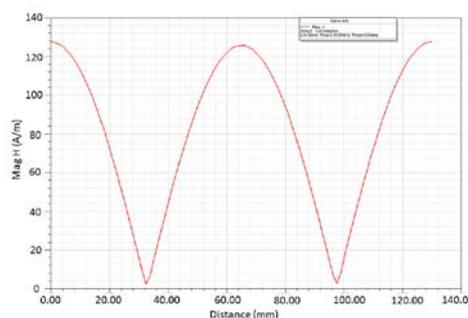


図11：空胴中心のy方向磁場分布

Solution Type をEigenmodeで計算し、近傍のモードの共振周波数を調べ、表1にまとめた。近傍のモードの共振周波数は十分に離れているため、問題ない。

表1：近傍モードの共振周波数

モード	Mode1	Mode2 (TM120)	Mode3
共振周波数 (MHz)	1694.77	2612.99	3427.19

## 6. チューナーについて

空胴に周波数調整のためのチューナーを取り付けた。チューナーは空胴壁の一部を薄く作っておき、その部分の壁を取り付けたピンで押し引きすることで、周波数の調整ができるものである。ピンはハンマーで動かす。このチューナー1本で150 kHzの周波数の調整が可能である。チューナーは共振モードの電場の誘起される位置に取り付けるのが最適である。そのため、TM120モードを考慮し  $a$  辺に1本ずつ、 $b$  辺に2本ずつ計6本取り付けた。

## 7. 横方向磁場のビームキック量

RF入力ポートから1 W入力時の空胴内のビーム軸上の磁場強度を図12に示す。最大磁場は125 A/m (=1.6 G) となった。

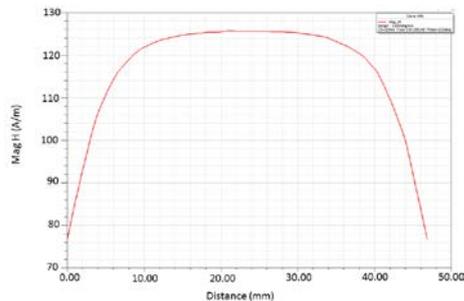


図 12：ビーム軌道上の磁場強度

偏向空洞を磁場のゼロクロス近傍のタイミングで用いれば、モニターでの垂直方向の大きさは次式で求めることができる。

$$\Delta y = \frac{2eL_s\sigma_z}{m\gamma c} \times B_0$$

バンチ長  $\sigma_z = 20$  ps の場合は 4W 入力で約 3G の磁場を発生させれば、蹴り角は 1 mrad となるため、モニター位置 0.3 m とするとビームサイズに対して約 3 倍の拡がりを実現できる。

空洞へ入力可能な最大パワーは RF アンプの最大出力 46 dBm (約 40 W) であり、この場合ビーム軌道上最大磁場は 790 A/m (= 9.9 G) である。この場合バンチ長  $\sigma_z = 20$  ps に対して 6.7 mrad の蹴り角が実現できる。

今回の RF 偏向空洞の設計値を下の表にまとめた。

表2：RF偏向空洞設計値

共振周波数	2612.9 MHz
共振モード	TM120
a 辺の長さ	121.01 mm
b 辺の長さ	129.98 mm
Lc の長さ	46.81 mm
ビームポート径 $\phi$	16 mm
入力ポート のカップリング $\beta_1$	1.04
モニターポート のカップリング $\beta_2$	0.002
Q <sub>L</sub> 値	10327
1W 入力時の ビーム軌道上の最大磁場強度 B <sub>0</sub>	125 A/m (1.6G)

## 8. まとめと今後

2612.9 MHz で TM120 モードを誘起する偏向空洞の設計を行った。

現在はこの偏向空洞の製作を行っている。空洞には冷却用パイプを取り付ける予定である。

今後は測定系 (Faraday cup と Picoammeter) を構築し、空洞を製作した後、ビームラインにインス

トールし、バンチ長測定を行う予定である。

## 謝辞

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] N. Yamamoto, et al., Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 1-3, 2011, Tsukuba, Japan)
- [3] 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)
- [4] <http://www.ansoft.co.jp/index.php?pid=faWV7>