

透過光型スピン偏極電子源を用いた逆光電子分光装置の開発

DEVELOPMENT OF TRANSMISSION-TYPE POLARIZED ELECTRON SOURCE FOR INVERSE PHOTOEMISSION SPECTROSCOPY

梶浦陽平^{#, A)}, 稲垣利樹^{A)}, 山本尚人^{B, A)}, 保坂将人^{B)}, 真野篤志^{B)}, 高嶋圭史^{A, B)}, 許斐太郎^{C)}, 加藤政博^{C, B)}
 Yohei Kajiura^{#, A)}, Toshiki Inagaki^{A)}, Naoto Yamamoto^{B, A)}, Masahito Hosaka^{B)}, Atsusi Mano^{B)},
 Yoshifumi Takashima^{A, B)}, Taro Konomi^{C)}, Masahito Katoh^{C, B)}

^{A)} Graduate School of Engineering, Nagoya University

^{B)} NUSR, Nagoya University

^{C)} UVSOR, IMS

Abstract

Transmission type (NEA-GaAs) spin-polarized electron sources, in which pumped laser light is injected from the back side of the photocathodes and the polarize beam is extracted from the front side, have been developed. By using this type photocathode, the high brightness of $\sim 2 \times 10^7 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ and the high polarization of $\sim 90\%$ were achieved. In UVSOR, we are planning to apply these types of photocathodes to the inverse photoelectron spectroscopy, and started to design compact 90° bend spin rotator.

1. はじめに

負の電子親和性を持った GaAs 型半導体 (NEA-GaAs) スピン偏極電子源は、高いスピン偏極度と輝度を兼ね備えた電子ビームを生成できるという特徴を持つ。この電子源開発において、名古屋大学では背面透過光型電子源を開発し、スピン偏極度 90%、輝度 $1.3 \times 10^7 (\text{A}/\text{cm}^2\text{sr})$ を達成している^[1]。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。光学系をフォトカソードのすぐ近くに置くことで、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。

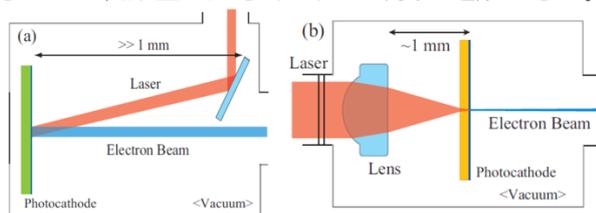


Fig. 1: Comparison of (a) Reflection type, (b) Transmission type

我々は UVSOR の光電子分光グループと協力して、本電子源を逆光電子分光に応用することを検討している。スピン偏極電子源を用いることで、スピン分解逆光電子分光が可能になるという利点があるためである。

また、NEA-GaAs 型電子源は GaAs 表面に Cs を吸着させることにより、真空準位が伝導帯最低準位よりも低くなっている。これにより励起レーザーのエネルギーを抑えることで、電子ビームのエネルギー

を極限まで抑えても電子ビームを生成させることができ、従来の逆光電子分光装置で技術開発の限界となっているエネルギー分解能(数百 meV 程度)が 100meV 以下になることも期待される。

現在、スピン偏極電子源から生成した電子ビームを逆光電子分光装置に導くための電子ビーム光学輸送系の設計を行っている。図 2 に設計中の逆光電子分光装置の概略図を示す。

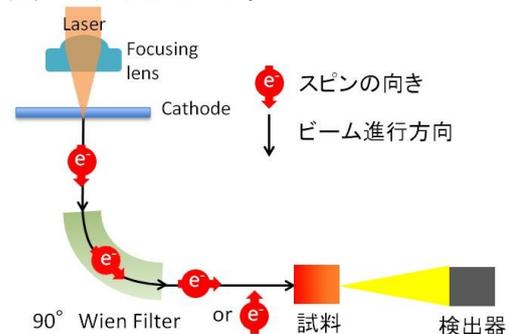


Fig. 2: Outline of Inverse Photoemission Spectroscopy

スピン分解測定を行うため、電子ビーム中のスピン方向を任意に走査する必要がある。本電子源は円偏向レーザーを照射することでスピン偏極電子ビームを生成している。円偏向の向きを変えることでスピンの向きが 180° 変わるため、Wien Filter でスピンの向きを 90° まで操作できるようにすることで、スピン方向が任意に選択できるようになる。そこで、ビーム偏向中に磁場と電場を同時にかける事で、Wien-Filter の機能を持った電子ビーム偏向器の設計を始めた。

[#] kajiura.yohei@b.mbox.nagoya-u.ac.jp

2. 90° 偏向型 Wien Filter

Wien Filter は一般的に直線型であり、ローレンツ力を 0 にするよう任意の磁場と電場を直交させることで、電子ビーム軌道は変えずにスピンの向きを走査する。電場が進行方向垂直にかかっており、かつ、その磁場がいずれにも直角になるようにかかっているとき、スピン運動方程式は、Thomas-BMT 方程式^[2]で表わされる。

$$\Omega = \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{e}{2m_e c} \left\{ \frac{E}{\beta} \left[(g-2) - \frac{g}{\gamma^2} \right] + B(g-2) \right\} \frac{L}{v}$$

小型な本電子源の特徴を生かし、実験室レベルで分析を行うことが出来るコンパクトな装置構成にするためには、図 2 で示したように垂直方向に生成した電子ビームを水平方向に偏向することが望ましい。ビーム中のスピンの向きを走査するためには Wien Filter の機能が必要であるが、従来の直線型でなく、ビーム偏向部分にその機能を持たせた 90° 偏向型 Wien Filter を新たに開発することで、より装置をコンパクトにすることができる。

3. Poisson による二次元磁場設計

3.1 設計目標

設計を行う際の目標は以下の 2 点である。

- ・磁極間ギャップ 50mm
- ・磁場による偏向軌道(曲率半径)R=50mm

製作を容易にするためには、静電コンデンサのみを真空内に配置し磁場はチャンパー外からかけることが望ましく、そのためには磁極間ギャップを最低 50mm 空ける必要があると考えた。また、静電コンデンサによる偏向軌道と磁場をかけた際の偏向軌道を極力近づけるために、漏れ磁場を含めた軌道が曲率半径 R=50mm を実現することを目標とした。チャンパーを囲い込む C 型コイルをベースとして設計を始めた。図 3 は後に記述する 3D モデル図である。

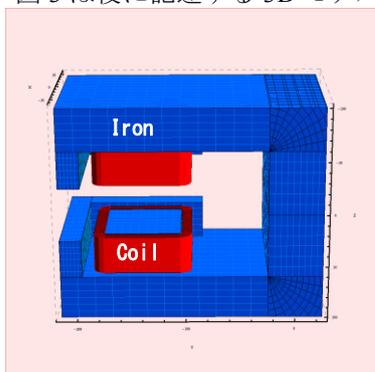


Fig.3: 3D C-type coil model

三次元での解析を行う前に、二次元電磁場解析コード Poisson を用いて大まかな設計を行った。

3.2 漏れ磁場問題

磁極間ギャップを 50mm と比較的大きく取っていることから、磁極から 150mm 離れた地点でも 1G 程度の漏れ磁場が残ってしまう。この磁場の影響を受け、電子ビーム軌道が曲がった状態で磁極に入射するため、通常の C 型構造では R=50mm の円軌道にそって電子ビームを偏向させることが困難であることが分かった。

3.3 リターンヨークの設置

漏れ磁場を低減させるためにリターンヨークの設置を試みた。これは磁極から漏れ出した磁力線をリターンヨーク側に引き込むことにより、外に漏れ出ていく磁力線を減らすことを意図したものである。解析の結果、大きく漏れ磁場を低減できることが分かった。図 4,5 にリターンヨーク設置位置と、その際の磁場分布を示す。図 3 のモデル図を二次元で切り出したものであり、紙面垂直方向からビームが入り、水平方向にビームが出ていくことを想定している。ヨーク 2 を設置した解析結果では、磁極から 50mm 地点で漏れ磁場が 1G 以下になることを確認した。そして、リターンヨークを設置した場合でもピーク磁場強度は変わらないことが分かった。

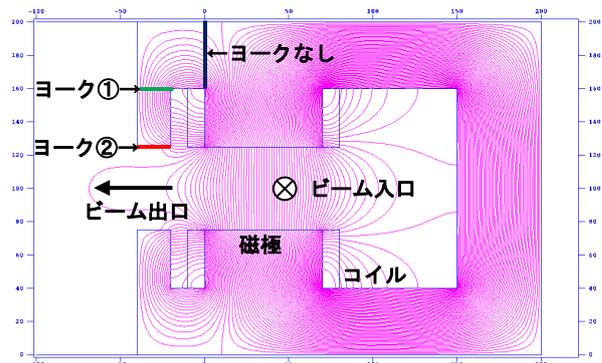


Fig.4: Magnetic contour lines (Poisson)

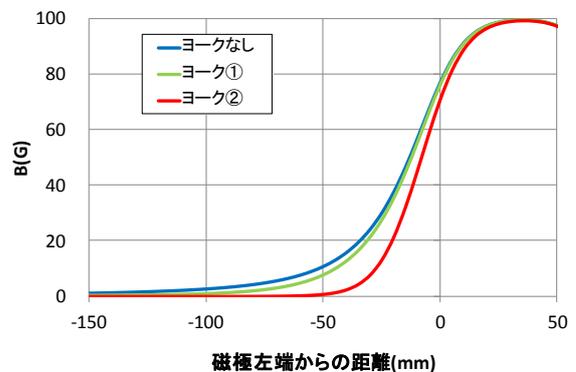


Fig.5: Comparison of magnetic field distribution (with yoke or not)

また、当然であるがリターンヨークを設置することで、目的とする磁場と逆方向の微小な磁場が磁極から離れた位置でかかることが分かった。これは、リターンヨークから漏れ出した磁力線の影響であると考えられる。この特徴は三次元解析でより顕著になり、ビーム入射前に電子軌道が外側に蹴られることで、理想的な R=50mm の偏向軌道に近づく要因となった。

4. Radia による三次元磁場設計

4.1 三次元計算への拡張

Poisson による二次元での解析結果をもとに、三次元磁場計算コード Radia^[3]を用いて三次元での磁場解析を行った。これは漏れ磁場を含めた総合的な軌道計算を行うためである。図 6 は作成した 3D モデル図である。全体像を見やすくするためにビームの入口から見て逆側からの図になる。ビームの入口と出口にそれぞれリターンヨークを設けており、奥のリターンヨークのある方が入口側で、手前のリターンヨークのある方が出口側である。

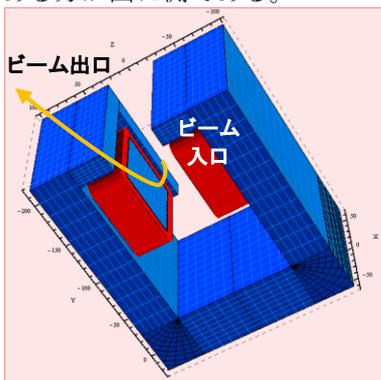


Fig.6: 3D C-type coil model

3D モデルでの磁場分布を図 7,8 に示す。Poisson での解析結果と比較して、5G ほどピーク磁場強度は低くなったが、磁場分布の傾向は似通っている。しかし、磁極から離れた位置の逆方向磁場強度に違いが見られた。この磁場は微小であるために立体構造にしたことの影響を受け、2D 解析に比べ強度が大きく出たものだと考えられる(リターンヨークのない 3D モデルの解析では逆方向磁場は見られなかった)。そして、この逆方向磁場はビーム入口側(垂直方向)とビーム出口側(水平方向)でも磁場強度に違いがあることが分かった。これは水平方向と垂直方向が非対照であり、リターンヨークの影響を直接受ける水平方向側がより磁場強度が大きくなったと考えられる。

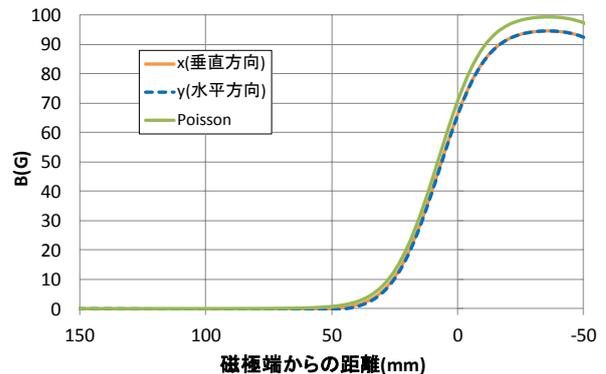


Fig.7: Comparison of magnetic field distribution (3D)

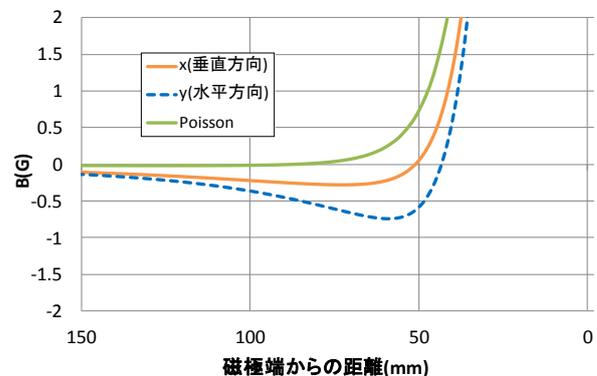


Fig.8: Comparison of magnetic field distribution (3D)

4.2 磁気シールドポールの設置

漏れ磁場をさらに低減するため、チャンバー内に磁気シールドポールを設置することを仮定して 3D モデルを作成した。磁極から 10mm 離れた位置に外径 30mm、内径 20mm、高さ 50mm の角柱型磁気シールドポールを設置した。その際の 3D モデル図を図 9 に示す。

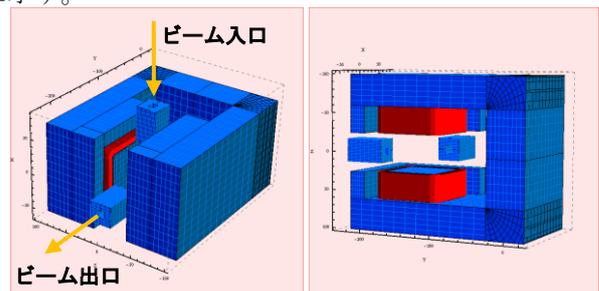


Fig.9: 3D model (with magnetic shield pole)

水平方向の磁場分布を図 10,11 に示す。シールドポールを設置することで、さらに漏れ磁場を低減させることが可能であることが確認できた。

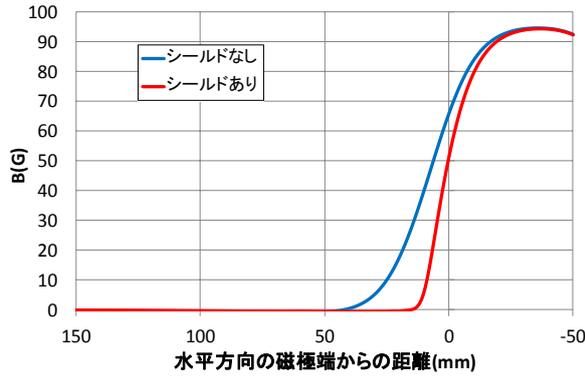


Fig.10: Comparison of magnetic field distribution (with magnetic shield pole or not)

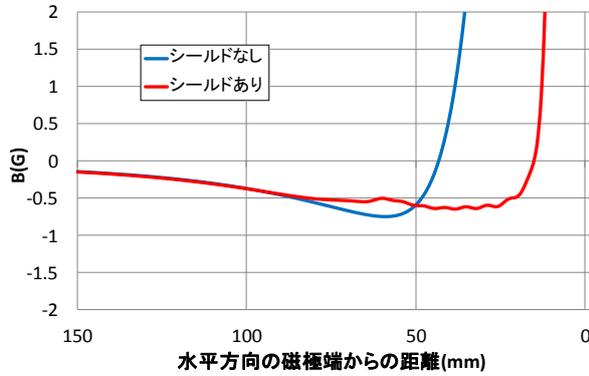


Fig.11: Comparison of magnetic field distribution (with magnetic shield pole or not)

図 12 は三次元で磁場分布を表わしたものである。等高線が磁場強度を表わしている。磁気シールドポールの効果を視覚的に見る事ができる。

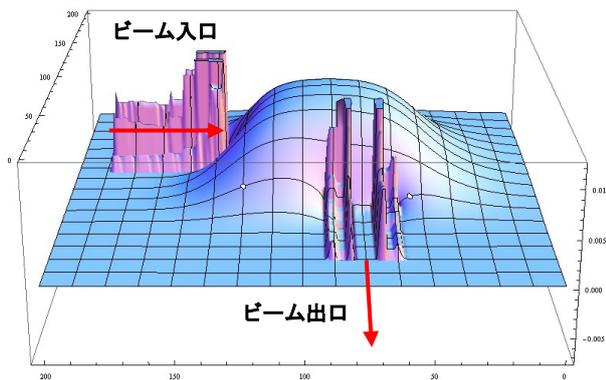


Fig.12: 3D magnetic field distribution

4.3 軌道計算

最終的に決定した構造において軌道計算を行った。結果を図 13,14 に示す。

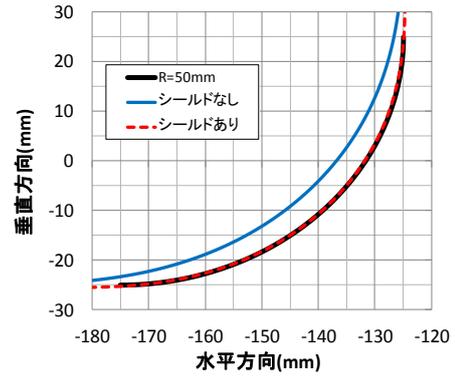


Fig.13: Orbital calculation

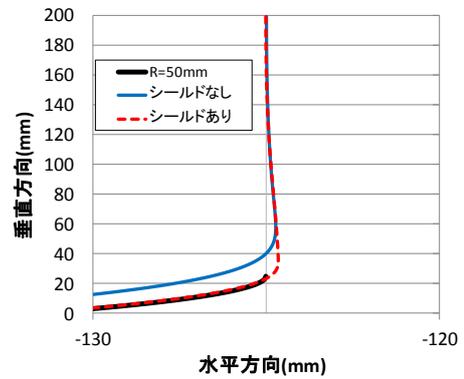


Fig.14: Orbital calculation

図 14 より逆方向磁場の影響によって磁極に入る前にビームが外側に蹴られていることが分かる。ビームが磁極に入る時(図中の垂直方向 25mm の位置)で、軸とのずれが 0.2mm、角度 60mrad ある。このずれと漏れ磁場が上手くキャンセルすることで偏向軌道はほぼ R=50mm になった。R=50mm に対する分散はシールドなしの場合 0.718mm²、シールドありの場合 0.00322mm²である。また、シールドありの場合 R=50mm の円軌道との最大ずれ幅が 0.227mm と本目的としては十分な結果だと考えられる。図 15 は入射位置がずれた場合を考慮し、初期位置を変えて解析を行った結果である。収束効果があり、一般的な偏向電磁石と似通った光学特性を持つと考えられる。

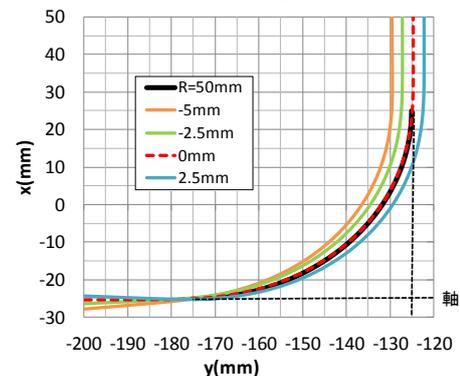


Fig.15: Orbital calculation (comparison of initial position)

4.4 軌道補正

ビーム入射から偏向するまでは理想的な軌道を描くことが確認できたが、ビームが磁極から出た後も逆方向磁場によりビームが外側に蹴られてしまう。この結果磁極から 225mm 離れた位置で、軸に対し 2mm、角度 13mrad のずれが生じてしまう。この問題の解決策として以下の2つが考えられた。

- ・リターンヨークを短くする
- ・出口側の磁気シールドポールを磁極から離す

リターンヨークを短くすることは、逆方向磁場が弱くなることに繋がる。また、磁気シールドポールを磁極から離すことで漏れ磁場が大きくなり、ビームが磁極から出て外に蹴られる前にビーム軌道が軸より内側に入ることで、最終的な軌道が軸に近づく。これらを踏まえ、リターンヨークを 5mm 短くし、出口側の磁気シールドポールをさらに 0.5mm 磁極から離れた(磁極との距離を 10.5mm とした)。比較結果を図 16 に示す。補正を行うことで、磁極から 225mm 離れたところでの軸とのずれを 0.1mm、角度 2mrad まで減少させることができた。

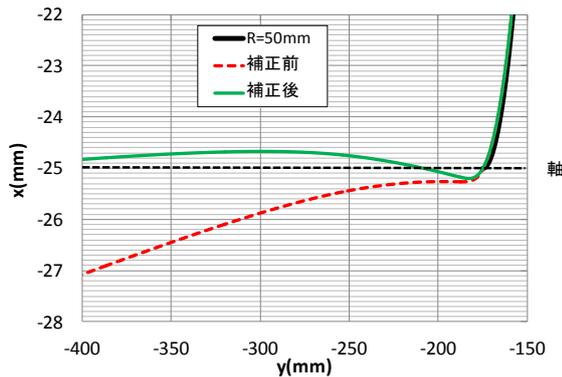


Fig.16: Orbital calculation (after correction)

5. まとめと今後

90° 偏向型 Wien Filter のための磁場設計、及び軌道計算を行った。リターンヨークと磁気シールドポールを設置することにより、R=50mm の円軌道とのずれが最大で 0.227mm の本目的としては十分な磁場設計を行うことができた。また、ビーム出口側の軸とのずれはリターンヨークの長さや磁気シールドポールの位置により補正できることが分かった。現在、この結果をもとに装置製作を行っている。

今後はビーム偏向中のスピン減偏極を見積もることと、電子ビームのエネルギー分解能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] N.Yamamoto, et al., Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 1-3, 2011, Tsukuba, Japan)
- [2] V. Bargmann et al., "Precession of the Polarization of Particles Moving in a Homogeneous Electromagnetic Field" Phys. Rev. Lett. 2. 435 (1959)
- [3] <http://www.esrf.eu/Accelerators/Groups/InsertionDevices/Software/Radia/>