

Development of Polarized Electron Source using transmission photocathodes

N.Yamamoto ^{*A)}, A.Mano^{A)}, Y.Nakagawa^{A)}, A.Utsu^{A)}, T.Konomi^{A)}, S.Okumi^{A)}, M.Yamamoto^{A)}
T.Nakanishi^{A)}, X.G.Jin^{B)}, T.Ujihara^{B)}, Y.Takeda^{B)}, T.Ohshima^{C)}, T.Yasue^{D)}, T.Koshikawa^{D)}
H.Horinaka^{E)}, T.Saka^{F)}, T.Kato^{G)}

A) Graduate School of Science, Nagoya University, Nagoya 464-8602, Japan

B) Graduate School of Engineering, Nagoya University, Nagoya 464-8602, Japan

C) Central Research Laboratory, Hitachi Ltd., Tokyo 185-8601, Japan

D) Fundamental Electronics Research Institute, Osaka Electro-Communication University
Osaka 572-8530, Japan

E) Faculty of Engineering, Osaka Prefecture University, Osaka 599-8531, Japan

F) Daido Institute of Technology, Nagoya 457-8531, Japan

G) Daido steel Co. Ltd., Nagoya 457-8531, Japan

Abstract

We have developed a new type photocathode (PC) for ultra-high-brightness polarized electron source (PES). For this purpose a point-like source is required, but it can not be realized by an available PES, since a distance between a laser focusing lens and the PC is typically larger than 100 mm and it makes a laser spot size on the PC larger than a diameter of 0.1 mm. This problem can be solved by changing a direction of laser-injection from a front-side to a back-side of the PC. This new PC is named as "transmission PC" and it realized the laser spot diameter as small as 1.3 μm on the PC for 780 nm laser wavelength. The transmission PC installed in a newly constructed 20-kV gun could already produce the polarized electron beam with the polarization of $77 \pm 5\%$ and the ultra-high-brightness of $1.0 \pm 0.4 \times 10^7 \text{ A}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{V}^{-1}$. The charge density lifetime of $1.8 \times 10^8 \text{ C/cm}^2$ was also obtained by this gun system.

背面透過光吸収型陰極を用いた偏極電子源開発

1. はじめに

NEA (負の電子親和性) 表面を付与した GaAs 型光陰極はスピン偏極電子源として広く利用されており、最近では低エミッタンスビーム生成への有効性が注目され ERL 計画など次世代加速器用の電子源としても期待されている。我々のグループは NEA-GaAs 型光陰極の性能向上を目指した研究を行っており、85%を越える高い偏極度と 0.5%の量子効率を同時に実現してきた^[1]。また、低エミッタンス実現への取り組みとしては NEA-GaAs 型光陰極から引き出した電子ビームの規格化エミッタンスを測定し 1mm のビームサイズに換算して 0.15 $\pi\cdot\text{mm}\cdot\text{mrad}$ の値を得、特に超格子型陰極が低エミッタンスビーム生成に有利であることを確かめた^[2]。

本研究において我々は新たに背面透過光吸収型の偏極電子源開発に着手した¹。偏極電子源を従来のレーザー正面入射型から背面入射型にすることでレーザーの空間構造を調整しやすくレーザーのスポットサイズをほぼ回折限界まで縮小することが可能になる。また、副次的に電子銃のビーム引き出し側の構造を単純化できるという利点もある。これら利点を活かすべく我々はまず低エネルギー表面電子顕微鏡 (SPLEEM)^[3]での応用を目指し電子源の設計を行った。SPLEEM

とは試料表面の磁区構造を観察するタイプの顕微鏡であり、本研究で開発した偏極電子源が実用化できればこれまで不可能であった磁区構造の実時間観測が可能となる。

SPLEEM 用偏極電子源の開発に向け、我々は背面透過光吸収型陰極と 20kV 直流型電子銃の開発を平行して行っている。すでに 20kV 電子銃の試作一号機は完成しており、現在は背面透過光吸収型陰極の性能向上を目指した R&D を行っている。また、これまでに達成した性能は、偏極度 $77 \pm 5\%$ 、ビーム寿命 $1.8 \times 10^8 \text{ C/cm}^2$ 、ビーム輝度 $1.0 \pm 0.4 \times 10^7 \text{ A}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{V}^{-1}$ である。

2. 20KV 直流型電子源

20kV 電子源の概観を図 1 に示す。電子源は、NEA 活性化部 (図 1 では未表記)、電子銃部、ビームモニタ部、ビーム移送部そして 100kV の加速電極を持つ Mott 型偏極度測定装置から構成されている。装置に導入された光陰極は NEA 表面活性化後に電子銃に移送され、生成された電子ビームはビームモニタ部を経てビーム移送部に導かれ、ここで進行方向に対し垂直にスピンを偏向された後、Mott 散乱分析器により偏極度が測定される。

電子銃の電極間距離は 5mm であり 20kV 印加時において 4MV/m の引き出し電界となる。また、生成さ

*E-mail: naoto@spin.phys.nagoya-u.ac.jp

¹特許出願番号 2006-084303 (中西 彊)

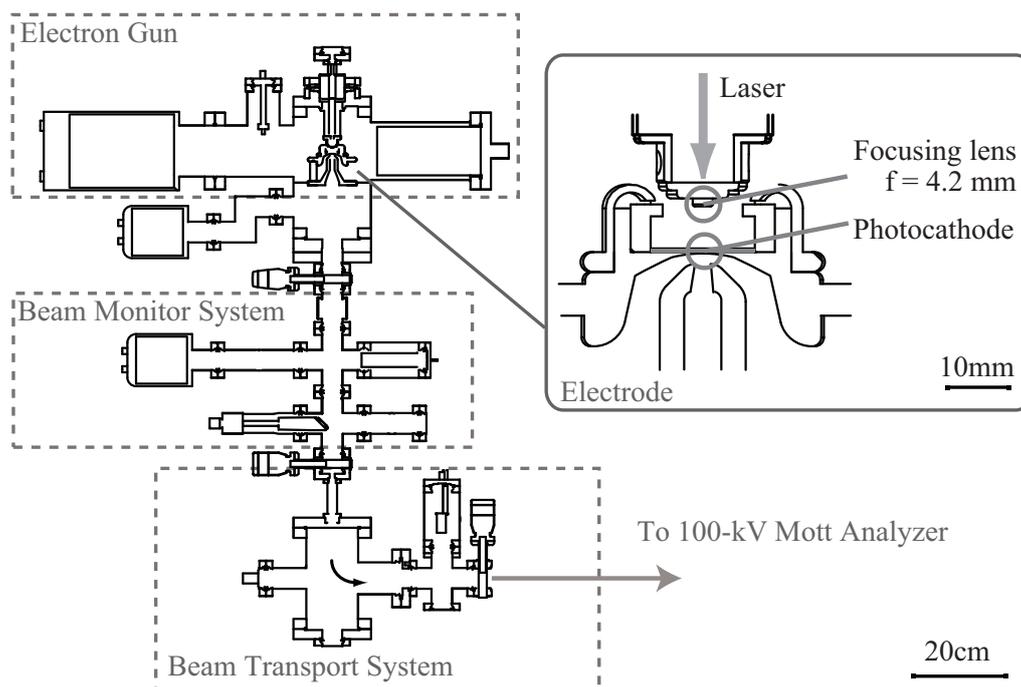


図 1: 20kV 偏極電子源の機械的構造

れる電子ビームは数 μm に絞られているため電極間の電界はほぼ平行とみなせる。電極の材質は純チタンを使用した。純チタンは我々の先の研究で優れた暗電流性能を持つことを確認されており^[4]、本電子銃では 25kV 印加時 (5MV/m) においても暗電流は 1nA 以下に抑えられた。

電極の陽極と反対側にはレーザー収束レンズを設置した。光ファイバーケーブルを介して運ばれたレーザーは円偏光に変換され電子銃に入射し、真空内において焦点距離 4.2mm の収束レンズにより光陰極表面に照射される。収束位置はレンズを上下に移動することで調整でき、実測では 780nm 付近の波長で半値全幅で $1.3\mu\text{m}$ までの収束が確かめられた。

電子銃内の真空を清浄に保ち NEA 表面の劣化を防ぐため 100L/s のイオンポンプと 2000L/s の NEG ポンプが用いられており、200 度のベーキング後 1×10^{-9} Pa 以下の極高真空度が得られている。この条件で NEA 表面の寿命測定を行ったところ、 1.8×10^8 C/cm² という高い電荷寿命密度が得られた。

3. 背面透過光吸収型陰極

3.1 歪み超格子構造光陰極

光陰極の基本的なデザインは従来型の 85% を越える高い偏極度と 0.5% の量子効率を同時に達成した GaAs-GaAsP 歪み超格子構造^[1]を採用したが基板については GaAs を GaP に変更した。GaP 基板は活性層となる超格子層よりバンドギャップが広い超格子薄膜の励起に必要な 780nm 付近の波長を透過させることができる。本論文で用いた光陰極は全て名古屋大学工学研究科の MOVPE 装置により作製された。

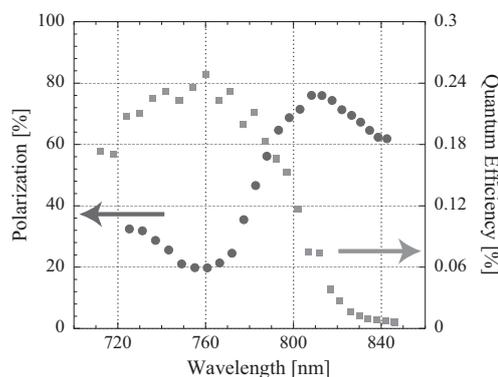


図 2: 偏極度と量子効率の波長依存性

3.2 偏極度と量子効率

背面透過光吸収型陰極と 20kV 直流型電子源を用いて得られた偏極度と量子効率の波長依存性を図 2 に示す。図 2 では、偏極度の値を丸印で量子効率の値を四角印で示している。測定の結果、レーザー波長 807nm において偏極度 $77 \pm 5\%$ 、量子効率 0.075% を得た。また、この測定は励起レーザーを光陰極表面に収束した状態で行った。光陰極より得られた電子ビームの偏極度はバッファー層の構造や P 組成比などの多様なパラメータにより異なっており、現在パラメータの最適化を行っている。

3.3 高電流密度引き出し

SPLEEM では加速器用電子源と比べ必要な電流量は平均数 μA と低いが、ビームサイズも数 μm と数桁小さいため結果として次世代加速器で要求される値

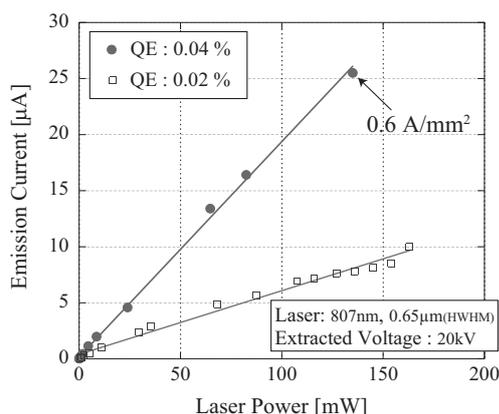


図 3: 引き出し電流のレーザー強度依存性

と等しいかより大きな電流密度が必要とされる。さらにビームの連続引き出しも要求されるため、電子ビーム生成を妨げる NEA 表面特有の現象である表面電荷制限（表面起電力効果）の影響が心配された。

図 3 に偏極度測定で用いたのと同じ光陰極で行った電子ビーム引き出し試験の結果を示す。ビーム引き出しは図 2 の測定で最大偏極度の得られたレーザー波長 (807nm) を用い、励起レーザーは半値全幅で $1.3\mu\text{m}$ に収束した状態で行った。測定は量子効率の違う条件で二回行っており、いずれにおいても電子ビームに対する顕著な制限効果は観測されていない。ここで電子ビームの活性層での拡散を考慮しビームソース径を $3\mu\text{m}$ と仮定すると²、電荷密度は $0.6\text{A}/\text{cm}^2$ と計算できる。これは従来の偏極電子源と比べて十分大きな値であり、従来型光陰極で表面電荷制限が起こらないと実証された値より 3 桁程度大きい^{5,6)}。

3.4 ビーム輝度

ビーム輝度³ B_r は電流 I を引き出したときのソース径 S とそこから距離 L に位置するビームモニタシステム (図 1 参照) で測定されたビーム径 D から次のように算出できる。ただし、この時のビームソース径 S はビーム光学的に逆算した値を用い、その値は実際の 7 割となる。また、これはビームエネルギー U で規格化された量であり還元輝度と呼ばれる。

$$B_r = I \cdot \frac{L^2}{\pi^2 \cdot S^2 \cdot (D - S)^2} \cdot \frac{1}{U} \quad (1)$$

実際の測定では電子ビームの安定性を考え最大電流を $16\mu\text{A}$ に抑え、 53.1cm 下流でビームサイズを測定した。この結果電流量の増加によるビーム径の増減はほとんど見られず、半値全幅で $1.00 \pm 0.02\text{mm}$ の値を得た。これらの値と 3.3 節で述べたビームソース径 $3\mu\text{m}$ を上式に代入すると、ビーム輝度は $1.0 \pm 0.4 \times 10^7\text{A}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{V}^{-1}$ であった。この値は電界放出型陰極とほぼ同じ性能である⁷⁾。

²バルク GaAs 内における電子の拡散長は $1\mu\text{m}$ 程度である

³加速器でビームの質を表すエミッタンスに反比例する $B \propto I/\epsilon_x\epsilon_y$

4. まとめと今後の予定

背面透過光吸収型光陰極を用いて電子ビーム生成径を $3\mu\text{m}$ に絞り込んだ 20kV 電子銃を開発した。 20kV 電極材にチタンを用い $5\text{MV}/\text{m}$ 印加時の暗電流を 1nA 以下に抑制した。さらに極高真空を保つことで $1.8 \times 10^8\text{C}/\text{cm}^2$ という実用に耐えうる長い寿命を実現した。背面透過光吸収型光陰極は従来用いられた GaAs 基板を GaP 基板に変更する手法により、これまでと同じ MOVPE 装置で作成した。現時点において偏極度 $77 \pm 5\%$ を達成し、引き出し電流密度においては $1.8\text{A}/\text{mm}^2$ と十分な性能を得た。今後の光陰極開発において量子効率は最低約 2 倍の向上を見込んでいる、偏極度はさらに結晶構造変更などの工夫を行い 80% 以上を目指し改良を行う予定である。

今回報告した SPLEEM 用 20kV 電子源試作機は実用に向け既に十分な性能を得ている⁸⁾。現在、本研究での結果を受け 20kV 電子源の実用機を設計中であり、遅くとも来年度中には SPLEEM として試料磁区構造の実時間観測を行う予定である。

5. 謝辞

本研究及びその一部は独立行政法人科学技術振興機構 (JST) の戦略的創造事業、要素技術プログラム (平成 17 年度採択、代表者 中西 彊)、独立行政法人日本学術振興会の特別研究員奨励費 (山本尚人, DC2) による支援を受けている。

参考文献

- [1] T. Nishitani, T. Nakanishi, M. Yamamoto, S. Okumi, F. Furuta, M. Miyamoto, M. Kuwahara, N. Yamamoto, K. Naniwa, O. Watanabe, *et al.*, Journal of Applied Physics **97**(9), 94907 (2005).
- [2] N. Yamamoto, M. Yamamoto, M. Kuwahara, R. Sakai, T. Morino, K. Tamagaki, A. Mano, A. Utsu, S. Okumi, T. Nakanishi, *et al.*, Journal of Applied Physics **102**(2), 024904 (2007).
- [3] E. Bauer, Reports on Progress in Physics **57**(9), 895 (1994).
- [4] F. Furuta, T. Nakanishi, S. Okumi, T. Gotou, M. Yamamoto, M. Miyamoto, M. Kuwahara, N. Yamamoto, K. Naniwa, K. Yasui, *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **538**(1-3), 33 (2005).
- [5] K. Togawa, T. Nakanishi, T. Baba, F. Furuta, H. Horinaka, Y. Kurihara, H. Matsumoto, T. Matsuyama, T. Nishitani, S. Okumi, *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A **455**, 118 (2000).
- [6] J. Clendenin, A. Brachmann, E. Garwin, S. Harvey, J. Jiang, R. Kirby, D. Luh, T. Maruyama, R. Prepost, C. Prescott, *et al.*, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A **536**(3), 308 (2005).
- [7] J. Orloff, Ultramicroscopy **28**(1), 88 (1988).
- [8] Y. Nakagawa, N. Yamamoto, A. Mano, M. Yamamoto, *et al.*, In this proceedings.