

DEVELOPMENT OF NEW TYPE PHOTOCATHODE FOR HIGH BRIGHTNESS POLARIZED ELECTRON SOURCE

Yasuhide Nakagawa^{A)}, Naoto Yamamoto^{A)}, Atsushi Mano^{A)}, Masahiro Yamamoto^{A)}, Shoji Okumi^{A)}, Tsutomu Nakanishi^{A)}, Xiuguang Jin^{B)}, Toru Ujihara^{B)}, Yoshikazu Takeda^{B)}, Takashi Ohshima^{C)}, Tsuneo Yasue^{D)}, Takanori Koshikawa^{D)}, Hiromichi Horinaka^{E)}, Takashi Saka^{F)}, Toshihiro Kato^{G)}

^{A)} Graduate School of Science, ^{B)} Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku Nagoya 464-8603, Japan

^{C)} Central Research Laboratory, Hitachi Ltd., 1-280, Higashi-Koigakubo, Kokubunji-shi, Tokyo 185-8601, Japan

^{D)} Fundamental Electronics Research Institute, Osaka Electro-Communication University, 18-8 Hatsu-cho, Neyagawa, Osaka 572-8530, Japan

^{E)} Faculty of Engineering, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Osaka 599-8531, Japan

^{F)} Daido Institute of Technology, 10-3 Takiharu-cho, Minami-ku, Nagoya 457-8530, Japan

^{G)} Daido Steel Co. Ltd, 2-30 Daido-cho, Minami-ku, Nagoya 457-8545, Japan

Abstract

We have started to develop a high brightness polarized electron source (PES) for application not only to high energy accelerators but also to low energy microscopes (for example LEEM). 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 photocathode (PC) is typically larger than 100mm and it makes a laser spot size on the PC larger than 0.1mm ϕ . This problem can be solved by changing a direction of laser-injection from a front-side of the PC. This new PL is named as "transmission PC" and it realized the laser spot diameter as small as 1.3 μ m on the PC for 780nm laser wavelength. The transmission PC installed in a newly constructed 20keV 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) $\times 10^7$ A.m⁻².st⁻¹.V⁻¹. The details of various beam performances achieved by the new gun system are described in this paper.

偏極電子源用透過光吸収型フォトカソードの開発

1. はじめに

我々は、次世代リニアコライダー用偏極電子源として、NEA-GaAs型フォトカソードを採用する偏極電子源の開発を進めてきた。また、近年、スピン偏極低エネルギー電子顕微鏡 (SPLEEM^[1]) への応用を行うために、偏極電子源の高輝度化を目指している^[2]。SPLEEMはLEEMを偏極ビーム化した電子顕微鏡であり、高輝度化により世界に先駆けて試料のナノ磁区構造の実時間観察が可能となる。

スピン偏極電子は、GaAs型半導体より生成される。GaAs半導体に円偏光レーザーが照射されると、価電子帯から伝導帯へ偏極した電子が励起される。さらに高い偏極度を実現させるためには、価電子帯における重い正孔バンドと軽い正孔バンドとを分離する必要がある。そのために、我々は、歪み薄膜と超格子構造を同時に実現した歪み超格子構造薄膜を製作し、GaAs-GaAsP歪み超格子フォトカソードにおいて~90%の偏極度と~0.5%の量子効率を実現できた^[3]。

GaAs型半導体中で生成された偏極電子は、負の電子親和性 (Negative Electron Affinity, NEA) 表面

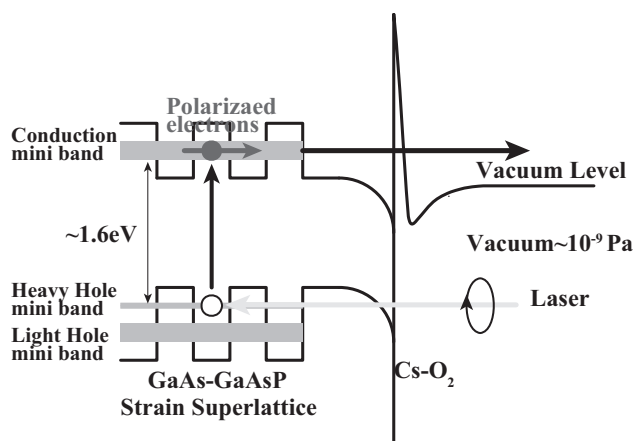


図1：偏極電子の生成、放出過程

により真空中へと引き出される。NEA-GaAs型フォトカソードの偏極電子生成過程を図1に示す。一般に、NEA表面はエネルギー幅の狭い電子ビームの引き出しに優れている。さらに、超格子構造により形成されるミニバンド構造を用いることにより、NEA-GaAs超格子型フォトカソードは超低エミッタ

¹ E-mail: nakagawa@spin.phys.nagoya-u.ac.jp

ンスビームが生成可能であることが我々によって証明された^[4]。

NEA-GaAs型フォトカソードは、さらに、量子効率も高くでき、次世代放射光源用高輝度電子源としても注目されている。

2. 透過光吸収型フォトカソード

高輝度電子ビームの生成には、励起レーザー光を小さなスポットに収束させることが不可欠であるが、従来の前面レーザー照射型光学系では、収束レンズとフォトカソード間の距離を縮めるのが難しく、微小スポットが得られない。そこで、入射レーザー光を結晶背面より照射し、この距離を最小化することによって、波長780nmにおいて半値全幅1.3 μ mのスポットを得た(図3)。

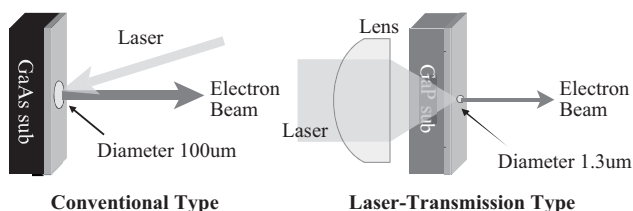


図2：レーザー前面照射型と背面照射型の光学系

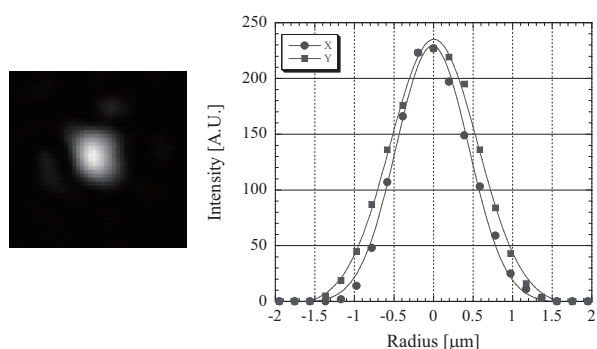


図3：フォトカソード超格子面でのスポット像

背面レーザー照射型フォトカソード実現のために、本研究では、従来のGaAs基板に代わり、GaP基板上にGaAs-GaAsP歪み超格子を活性層とする結晶を作製した。GaPは活性層となる歪み超格子に比べ、バンドギャップが広く、偏極電子を励起させる780nm付近のレーザー光を透過させることができる。本研究における結晶は、名古屋大学工学研究科のMOVPE装置によって作製された。

透過光吸収型フォトカソードの量子効率は、背面レーザー照射系において最大0.2%を得ている。また、フォトカソード透過後の円偏光度は径1mm、波長807nmの平行レーザー光を背面照射した場合に、99%以上の円偏光度を保っていることを確かめた。

透過光吸収型フォトカソードによるビーム輝度は、SPLEEM用に開発された背面レーザー照射型20kV直流型偏極電子源による測定で $(1.0 \pm 0.4) \times 10^7$ A/(sr.m².V)であった^[5]。これは、従来型に比べ3桁高い値である。

3. スピン偏極度測定

3.1 偏極度、量子効率スペクトラム

透過光吸収型フォトカソードと20kV直流型電子源を用いて得られたスピン偏極度と量子効率の波長依存性を図4に示す。偏極度の測定は、100kVの加速電極を持つMott散乱槽を用いた。レーザー光は超格子面に収束させ、波長807nmにおいて偏極度77 \pm 5%、量子効率0.075%の結果を得た。

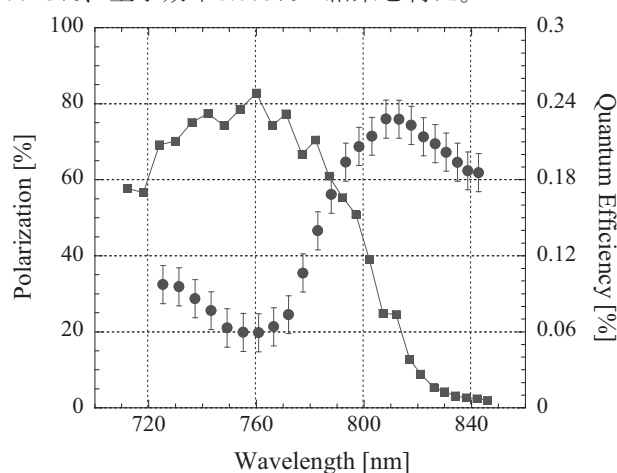


図4：偏極度と量子効率の波長依存性
偏極度を丸、量子効率を四角で示す

3.2 偏極度位置依存性

20kV電子源は、レーザー収束レンズと移送用光ファイバーを含むレンズステージを3軸方向に稼働させることが可能であり、レーザー収束点を3次元で変更できる。20kV電子源のレンズステージ構造を図5に示す。これにより、偏極度のフォトカソード位置依存性、および、レーザー収束位置依存性を測定できる。

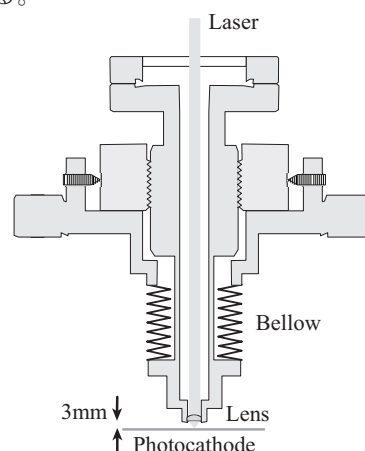


図5：20kV電子源のレンズステージ

透過光吸収型フォトカソードを用いた偏極度の位置依存性を図6に示す。レーザーは超格子面に収束

させ、レンズステージを1次元に400 μm 動かし、スキャンしている。

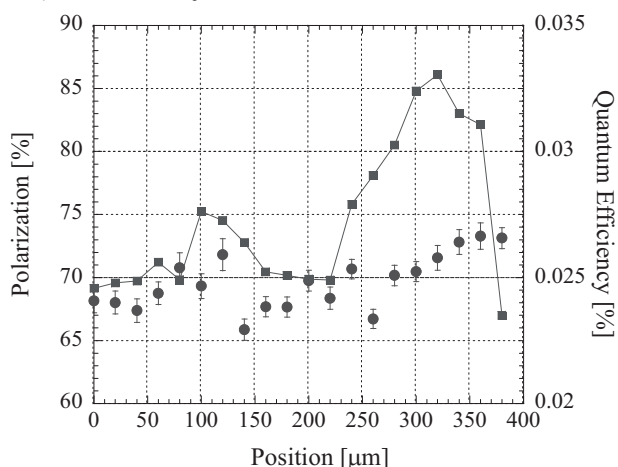


図6：偏極度と量子効率の位置依存
偏極度を丸、量子効率を四角で示す

偏極度は10 μm オーダーでは $\pm 3\%$ でふらつくのみであり、均一な偏極度を保つことができる。100 μm オーダーでは5%程度の格差が見られる傾向にあり、量子効率についても同様の傾向が見られる。図7はフォトカソード成長表面のノルムスキー像である。1 μm オーダーではクロスハッチが見られるが、100 μm オーダーの構造は確認できていない。

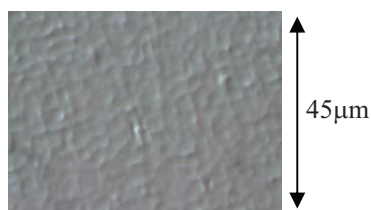


図7：成長表面のノルムスキー像

NEA表面は劣化しやすいという欠点を持ち、これを解決するために極高真空の作製が不可欠である。20kV電子源では 1×10^{-9} Pa以下の極高真空度により、 1.8×10^8 C/cm²のビーム寿命を達成している^[4]。さらに我々は、レーザー収束点をNEA表面が劣化するたびに移動し、実効的なフォトカソード寿命を延ばすことを考えている。また、SPLEEM稼働中は偏極度の測定が困難であり、偏極度の均一性が求められる。

3.3 偏極度レーザー収束依存性

偏極度のレーザー収束位置依存性を図8に示す。フォトカソードの平面上でのレーザー照射軸は固定し、収束点をz軸方向に $\pm 1\text{mm}$ でスキャンしている。横軸正は成長面の後での収束、負は基板内またはフォトカソード前部での収束を意味している。基板の厚さは350 μm である。

回折限界付近を除く非収束時には、照射レーザー光はフォトカソードに対し最大で30°傾いている。

しかし、偏極度に収束依存性はなく、レーザー収束位置による偏極度の大きな変化は見られなかった。

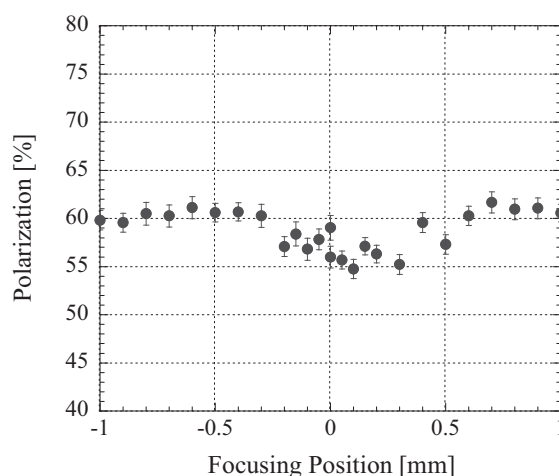


図8：偏極度の収束依存

4. まとめと今後

背面レーザー照射型フォトカソードを実現するためにGaPを成長基板に採用した透過光吸収型フォトカソードを開発した。まず、レーザーをスポット径1.3 μm まで収束させることができた。また、結晶構造、結晶面の最適化を図るなかで、現時点では、偏極度 $77 \pm 5\%$ 、量子効率0.2%を個別に達成できた。さらに、レーザー収束系においても、位置移動、収束点移動による大きな減偏極が見られないことを確認した。今後、80%以上の偏極度と0.5%近い量子効率を同時に得られるよう、改良を重ねる予定である。

20kV直流型電子源試作機はSPLEEM用電子源として、すでに十分な性能に達している。現在は、実用機を製作中であり、来年度中にはSPLEEMとして、試料のナノ磁区構造の実時間観察を行う予定である。

参考文献

- [1] E. Bauer, Reports on Progress in Physics 57(9), 895 (1994).
- [2] JST先端計測技術開発プログラム「スピン偏極電子源」(2005年度採択、チームリーダー 中西 彊)
- [3] T.Nishitani, T.Nakanishi, M.Yamamoto, S.Okumi, F.Furuta, M.Miyamoto, M.Kuwahara, N.Yamamoto, K.Naniwa, *et al.*, Journal of Applied Physics 97(9), 94907 (2005).
- [4] N.Yamamoto, M.Yamamoto, S.Okumi, T.Nakanishi, *et al.*, Journal of Applied Physics 102(6), 024907 (2007).
- [5] N.Yamamoto, A..Mano, Y.Nakagawa, M.Yamamoto, S.Okumi, T.Nakanishi, *et al.*, In this proceedings.