

Performance of Spin Polarized Electron Source for Low Energy Electron Microscopy and Applied to High Energy Accelerator

Shoji Okumi^{1,A)}, Makoto Kuwahara^{A)}, Atsushi Mano^{A)}, Yasuhide Nakagawa^{A)}, Tsutomu Nakanishi^{A)}, Xiuguang Jin^{B)}, Naoto Yamamoto^{B)}, Toru Ujihara^{B)}, Yoshikazu Takeda^{B)}, Masahiko Suzuki^{C)}, Michihiro Hashimoto^{C)}, Tsuneo Yasue^{C)}, Takanori Koshikawa^{C)}, Masahiro Yamamoto^{D)}, Takashi Ohsima^{E)}, Teruo Kohashi^{E)}, Takashi Saka^{F)}, Toshihiro Kato^{G)} and Hiromichi Horinaka^{H)},

^{A)} Graduate School of Science Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8602 Japan

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

^{C)} Fundamental Electronics Research Institute, Osaka Electro-Communication University, Osaka, 572-8530 Japan

^{D)} KEK, Tsukuba-shi, Ibaragi, 305-0801 Japan

^{E)} Central Research Laboratory Hitachi Ltd., Fuchu-shi, Tokyo, 185-8601 Japan

^{F)} Doido Institute of Technology, Minami-ku, Nagoya, 457-8531 Japan

^{G)} Doid-Steel Co. Ltd., Minami-ku, Nagoya, 457-8531 Japan

^{H)} Faculty of Engineering, Osaka Prefecture University, Sakai-shi, Osaka, 599-8531 Japan

Abstract

We have developed a spin polarized electron source for the spin polarized low energy electron microscopy (SPLEEM) that provide detailed real time observation of magnetic domain structure when the magnetic thin film is deposited to the substrate. The interelectrode dark current is kept less than 1nA under the extreme high vacuum environment as 5×10^{-10} Pa, and the polarized electron beam is drawn out in the electric field intensity of 4.2MV/m.

Also, the beam performance obtained the reduction brightness of $1.3 \times 10^7 \text{A} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$, as to focus the laser spot diameter to $1.2 \mu\text{m}$, by having the 90% spin polarization. Moreover, using the NEA surface photoemission mechanism, the electron beam with narrow of energy is emitted from photocathode. It seems to be useful for an electron source that needs a low emittance for high-energy accelerator

低エネルギー電子顕微鏡用スピン偏極電子源の性能と 高エネルギー加速器への応用

1. はじめに

低エネルギー電子顕微鏡 (Low Energy Electron Microscopy: LEEM) は基板上的薄膜の構造と形態の成長過程の観察に非常に有効な装置である。また、スピン偏極電子ビームを用いることによって基盤上の磁性薄膜の磁区構造の観察が可能となる。このスピン偏極電子源を備えた低エネルギー電子顕微鏡を SPLEEM という。SPLEEM の磁気感度はスピン依存の交換散乱に基づいており、スピンの左右非対称性による画像は試料の磁区に由来する特性を引き出す。

0.1秒以下で1画像を取得できる既存のLaB₆電子源のLEEMによって、薄膜成長の動画像観察が可能となっている。しかし、市販のSPLEEMは1画像を取得するのに10秒も掛かるために動画像観察は不可能である。すなわち、SPLEEMによる磁区構造の動

画像観察を可能にするには1画像を0.1秒以下で取得しなければならない。このためには、スピン偏極電子ビームの輝度を市販のものより2桁以上改善する必要があった。

上記の目的を達成するために、図1に示したレーザー光フォーカスレンズをフォトカソードに数mmまで近づけて回折限界まで絞り込み、従来の励起レーザー光照射方向を逆転させ、電子ビーム引き出し方向の背面から照射するスピン偏極電子源装置を設計した。それにもなつて、フォトカソードも背面照射を可能とする透過光吸収型フォトカソードの開発を行った。

これらによって、スピン偏極度90%の電子ビームを取り出し、レーザー光スポット径を $1.2 \mu\text{m}$ まで絞り込み、還元輝度として $1.3 \times 10^7 \text{A} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$ を得た。この高偏極・高輝度電子銃を高エネルギー用加速器に応用できることを報告する。

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

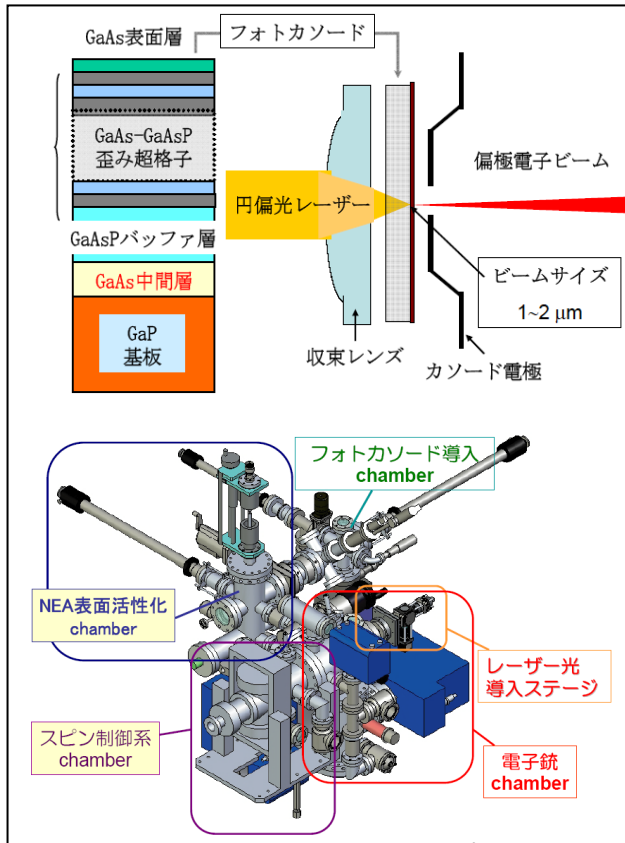


図1. 電子ビームの高輝度化のための背面照射透過光吸収型フォトカソードと概念図（上図）と20keVスピン偏極電子銃（下図）

2. 20keVスピン偏極電子源の性能

2.1 高電界電極と電極間暗電流

負電子親和性（NEA）表面を守る技術として、極高真空環境の保持という目的から、電極間の暗電流を徹底的に抑制することが求められる。

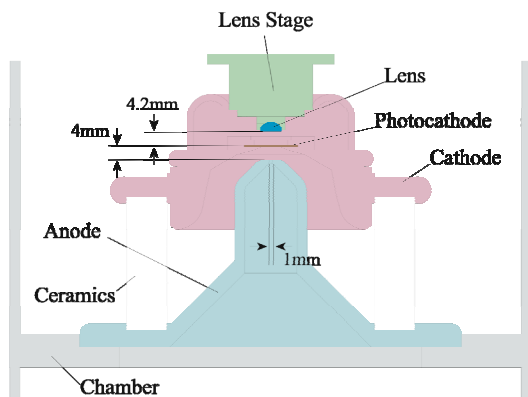


図2. Moカソード・Tiアノードの20keV電子銃電極対

-20kV印加によるカソード電極のフォトカソード表面には4.2MV/mの高電界が掛かるので、電極間暗電流の抑制手法として、カソード電極は電界放出暗電流の少ないモリブデン材、アノード電極は電子で叩かれても2次電子放出やガス放出が少ないチタン材で作るのが有効とする実験結果とknow-howから図2に示す電極対を作成した。

初期エージングによって電極表面を清浄化した結果、電極間暗電流を含む全暗電流を1nA以下に抑制することができた。

なお、アノード電極のビーム透過孔は小さいほど下流からフォトカソードへ逆流するイオン衝撃を削減でき、その他の放出ガスなどに対する差動排気が出きる。そこで透過光吸収フォトカソードから放出される電子ビーム径が2μm以下にできることを考慮して1mmφとした。

2.2 極高真空環境

レーザー励起されたフォトカソード半導体の伝導帯から真空中へのビーム取り出しを可能にするNEA表面を保護し、その劣化を遅らせるために電子銃チャンバーを 10^{-10} Pa台の極高真空環境を実現することが望ましい。そのために、電子銃チャンバーと電極に複合電解研磨を施し、100 1/s のイオンポンプと2000 1/s のNEGポンプを用いて 5×10^{-10} Paの極高真空を作成した。もちろん、差動排気チャンバーを 10^{-9} Pa台の超高真空にしてある。

2.3 電子ビームサイズと輝度

既に述べたが、レーザー光フォーカスレンズを透過光吸収型フォトカソードの背面に4mmまで近づけて照射することによって、レーザー光スポット径を1.2μmまで絞り、還元輝度として $1.3 \times 10^7 \text{A} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$ を得た。

2.4 NEAフォトカソードからの電子ビーム

20kVの加速電圧を掛けてGaAs-GaAsP歪超格子フォトカソードからNEA放出機構を利用して、レーザー波長780nmで、量子効率0.06%（同様の超格子フォトカソードの全面からのレーザー励起で0.5%のQEを得ているが）、偏極度90%の電子ビームを引き出した。このとき、最大電流密度として、 $5 \text{A}/\text{mm}^2$ を得た。

我々が利用するスピン偏極NEA放出機構とは図3に示すように、表面近くにpドーピングをすることでバンドベンディングを行い、直接遷移型半導体に歪みを掛け、超格子構造にして価電子帯の重い正孔と軽い正孔のΓ点での縮退を解き、その半導体表面にCsを添加することによって真空表面準位を伝導体の底より下げた負電子親和状態のNEA表面を作成して、この半導体にバンド間エネルギー幅だけの円偏光励起レーザーを照射し、スピン偏極電子ビームを取り出す方法のことである。

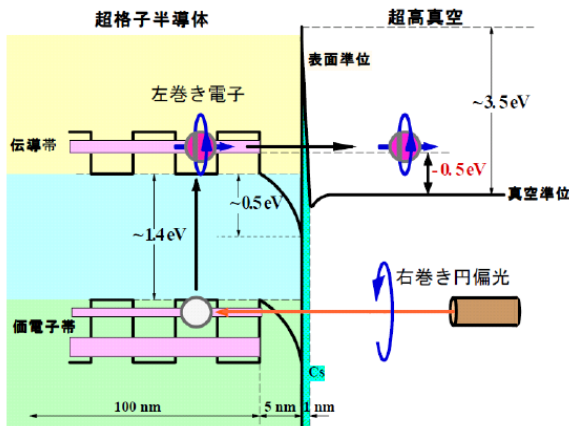


図 3. GaAs系超格子フォトカソードのNEA放出機構

3. 高エネルギー加速器への応用

3.1 NEA放出機構と低エミッタンス電子ビーム

ILCやERL用高エネルギー加速器では低エミッタンス電子ビームを求めている。NEA放出機構を持つ電子源は熱電子型や電界放出型電子源よりも引き出した電子ビームのエネルギー幅を小さくすることに優位性を持っている。この仕組みを図4に示す。

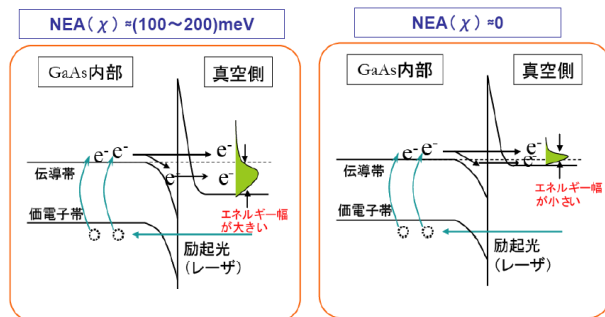


図 4. NEA表面を使用した電子ビームのエネルギー分布幅

バンド間光励起機構を前提とすると、伝導帯の底にある電子が真空中へ放出されるときエネルギーは結晶格子振動に相当する熱エネルギーとNEA表面のバンドベンディング領域で得る加速エネルギーのみである。NEAの大きさを零に近づけると加速エネルギー幅は零になるので、残るのは室温での半導体結晶温度に相当する約27meVの熱エネルギーだけである。

この値は熱電子型電子源などの最小値約300meVに比べて1桁小さい。負電子親和度が無いという理想値では量子効率が低くなりすぎるが、NEA幅を制御出来れば、このNEA放出機構を使って電子ビームの低エミッタンス化に有用であると思われる。我々は1mm半径のレーザー光で室温のGaAsフォトカ

ソードを照射したときの熱エミッタンスが0.15πmm·mradとなることを実験で確かめた。

3.2 透過光吸収型フォトカソードとNEA寿命

50~100mAという大電流を必要とするERL用電子銃への応用には、量子効率を0.1%とするとCWで100W以上のレーザーパワーが必要となる。これに耐えるためには、冷却機構を持ったカソードにするなど、フォトカソードの温度上昇を緩和する方法を考慮しなければならない。

通常の前面照射の電子銃ではフォトカソードパックや陰極極にレーザー光が当たり発熱する。しかし、背面照射による透過光吸収型フォトカソードは理想的にはレーザー光を量子効率分のみ発熱させ、フォトカソードを透過したレーザー光はビームライン側に脱けて行くため、量子効率を維持できNEA寿命を延ばせる。

4. まとめ

100mAもの大電流を取り出す高エネルギー用電子源には、電極間暗電流の削減やフォトカソードの量子効率とビーム寿命、NEA表面の保護などを考えると、現状より1桁低い 10^{-10} ~ 10^{-11} Paの極高真空技術が必要であろう。これには電極など内蔵する部品やチャンバーの材質の選択と研磨等のトリートメント処理、さらにポンプ系の設計と差動排気などを真剣に考える必要がある。

しかし、スピン偏極を伴わないERL用電子銃にも、我々が開発した高偏極・高輝度電子銃の特性であるNEA放出機構が有効であり、背面照射方法の透過光吸収型フォトカソードの使用が適していることを報告した。

参考文献

- [1] F. Furuta, T. Nakanishi, S. Okumi et al. *Nucl. Instr. and Meth.* A379 (1996)
- [2] T. Nishitani, T. Nakanishi, M. Yamamoto et al. *J. of Appl. Phys.* 97 (2005), 094907
- [3] N. Yamamoto, M. Yamamoto et al. *J. of Appl. Phys.* 102 (2007), 024904 (6pages)
- [4] N. Yamamoto, T. Nakanishi et al. *J. of Appl. Phys.* vol.103, No. 6 (2008), 064905
- [5] X. Jin, N. Yamamoto et al. *Appl. Phys. Express* 1 (2008), No. 4, Article No.: 045002
- [6] X. Jin, Y. Maeda, T. Saka, T. Ujihara et al. *J. of Crystal Growth* 310 (2008) p5039-5043