

HIGHLY POLARIZED AND HIGH QUANTUM EFFICIENCY ELECTRON SOURCE USING TRANSMISSION-TYPE PHOTOCATHODE

N. Yamamoto^{*A)}, X.G. Jin^{B)}, F. Ichihashi^{B)}, A. Mano^{A)}, T. Niwa^{B)}, T. Ujihara^{B)}, Y. Takeda^{B)}, T. Nakanishi^{C)}

^{A)}Nagoya University Synchrotron radiation Research center, Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8603

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

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8603

^{C)}Graduate School of Science, Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8602

Abstract

Recently, we developed transmission-type spin polarized photocathodes (PCs). In the development, a commercially available GaP wafer with high Zn doping of $1.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ was employed instead of a GaAs substrate because that is transparent for 780-nm excitation laser light. In the early phase of the development, both of the electron spin polarization and quantum efficiency were relatively lower than conventional reflection-type PCs. Nowadays, the electron spin polarization of $\sim 90\%$ and quantum efficiency of 0.4% was already achieved simultaneously using the transmission PC with GaAs-GaAsP strained superlattice layers. We are making further R&D to improve its quantum efficiency and further experiments such as generation of short pulse beam are scheduled.

透過光型フォトカソードを用いた高スピン偏極・高輝度電子源の開発現状

1. はじめに

NEA-GaAs フォトカソードはスピン偏極・低エミッタンスの電子源として開発が進められている。名古屋大学を中心とするグループは NEA-GaAs フォトカソードの開発を 20 年以上行っており、既に 2002 年にはスピン偏極度 90% 以上、量子効率 0.5%^[1] を 2005 年にはナノ秒スケールのマルチバンチビーム^[2] を GaAs-GaAsP 歪み超格子薄膜において達成している。

さらに我々は 2007 年に新たに透過光型フォトカソードの開発を行った。透過光型とは励起レーザーを透過できることを意味し、これを用いることでレーザーによるフォトカソードの温度上昇が抑えられ、電子銃設計の自由度向上も期待できる。

開発においては従来型として実績のある GaAs-GaAsP 超格子薄膜フォトカソードのデザインを踏襲し、基板を GaAs から GaP に変更した。初期においては、同時に開発した 20kV の電子銃において従来を遙かに上回るビーム寿命や輝度が実証された^[3] が、フォトカソード構造に依存するスピン偏極度および量子効率は従来型には及ばなかった。しかし、最近の開発においてはフォトカソード構造を最適化することでスピン偏極度および量子効率においても従来型と同等の性能を得ている。

本プロシーディングスでは、本開発について簡単にレビューするとともに透過光型フォトカソードを用いた開発の現状を紹介する。

2. 高輝度電子銃

2.1 設計

電子銃運用時の NEA 表面寿命はフォトカソード周囲の真空度と暗電流に非常に強く依存するため、電子銃設

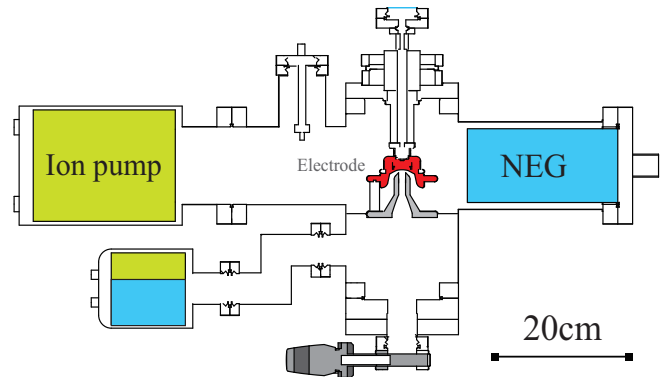


図 1: 高輝度電子源の模式図

計は特にこれらの点に注意を払い行った。

図 1 に電子銃の模式図、図 2 に電界計算コード POISSON により得られた結果、表 1 に電極のパラメータを示す。電極は我々の先の研究より暗電流特性が良いと考えられるモリブデンカソードとチタンアノードで製作した^[4]。定格の印加電圧は 20kV とし、電極間距離は初期は 5mm としたが実際の運用時に暗電流の問題が生じなかったため現在は 4mm に変更している。

電極形状は POISSON での電界計算をもとに自作コードにおいて電子ビームトラッキングを行い最適な形状を決定した。透過光型フォトカソードでは背面からの励起レーザー光入射が可能であるため、電極形状決定、特にアノード径は純粋に電子ビームの大きさを計算により求め決定した。本電子銃の光学系を用いた場合フォトカソード表面での電子ビーム径は数 μm となるため 4mm 下流においてもビーム径は 10 μm 程度であるが、電子ビームの軸がアノードとずれた際にビームハローがア

* naoto@nagoya-u.jp

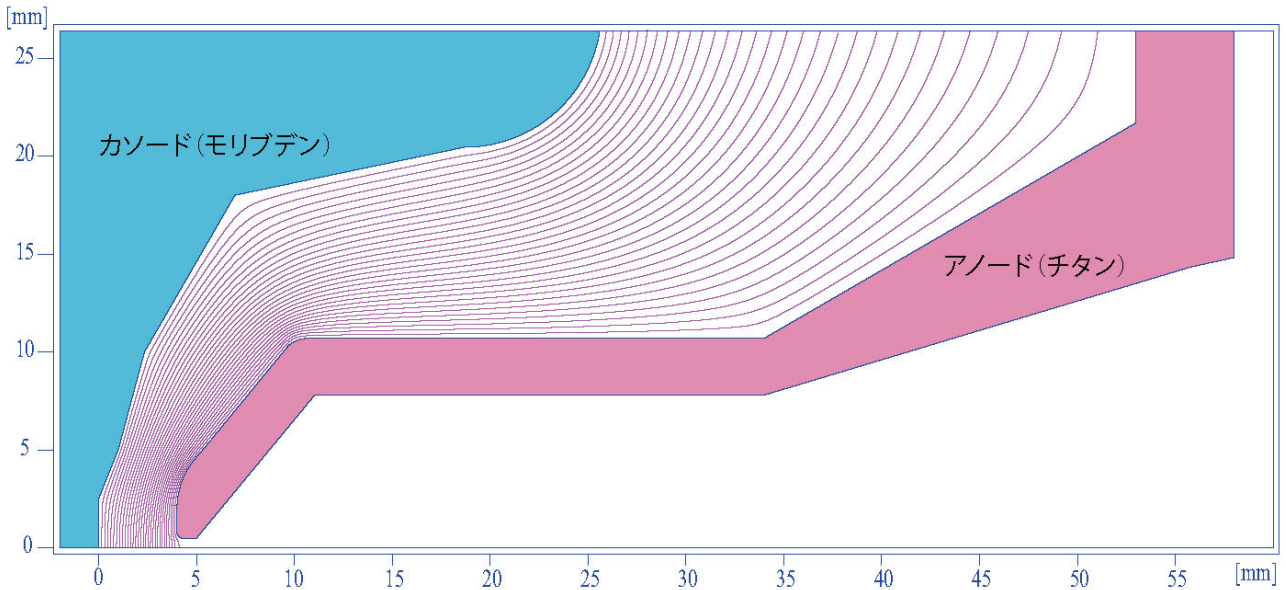


図 2: 高輝度電子銃の電界分布

ノードを叩くことで発生する脱ガスによる真空劣化を考慮してアノード直径は 1mm と決めた。また、カソードはアノード下部から 3 本の柱状セラミックで支持しているが、生成された電子ビームが直接セラミック部分を覗かないように電極形状を工夫した。

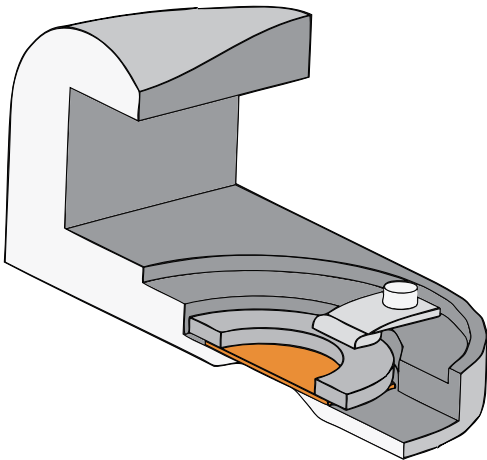


図 3: 透過光型フォトカソードマウント時の様子 (手前側は断面となっている)

図 3 に透過光型フォトカソードを、フォトカソードパックと呼ばれる真空装置にマウントした際の模式図を示す。図の上部が励起レーザーを入射する背面側、下部が電子ビームの射出方向となっている。数百ミクロンの厚さの透過型フォトカソードは、パックに収まるよう長方形に劈開されこれを中心部に穴の空いた円形リングとタンタル板バネで押さえつけることでマウントされる。板バネは図中では一つしか示していないが実際には 3 箇所から均等に抑えつける構造となっている。フォトカソードパックはモリブデンで製作されそれ自身が電極の一部をなしており、図中フォトカソード下の斜めの部分がカ

ソードウェネルトの一部となり、図中左側の大きいでっぱり部分がカソードのガードリングの一部となっている。さらに、フォトカソードの上側には半径 14mm 程度の空間が空いており、この部分にチャンバー上部からペローズとマコールにより支持された集束レンズが配置される。

フォトカソードパックを含め各電極は電解複合研磨処理を行った。この処理により得られた電極の表面粗さは、チタン材質のもので平均 10-20 nm (Ra), 最大 170-175 nm (Rmax)、モリブデン材質のもので平均 15-25 nm (Ra), 最大 110-180 nm (Rmax) であった。また、POISSON による電界計算の結果、暗電流抑制に最も気をつけるべき箇所であるカソード側の最大電界は 20kV 印加時において 4.7MV/m となり、十分許容範囲に収まる値とできた。

真空設計については電子ビーム生成時においてもフォトカソード付近の真空度を極高真空に保てるよう電子銃内部のアノードより上流側 (電子銃部) と下流 (差動排気部) の 2 つに分けた。真空ポンプは電子銃部及び差動排気部ともに NEG ポンプとイオンポンプを配置し、ベーキングなど真空立ち上げ時のみ 2 つの部分が高いコンダクタンスで接続できるように電子銃側面に上下流部接続用配管とゲートバルブを設けている。

表 1: 電子銃電極のパラメータ

| | |
|-----------|----------|
| 電極間電圧 | 20 kV |
| カソード材料 | モリブデン |
| アノード材料 | チタン |
| 電極間距離 | 4 mm |
| カソード側最大電界 | 4.7 MV/m |

2.2 運用

電子銃は 3 から 4 日間約 200 度でベーキングを行うことにより、電子銃部 10^{-10} Pa 後半、差動排気部 10^{-9}

Pa 前半の極高真空に達した。また電子銃運転中、ビーム電流数 μA を生成し差動排気部が 10^{-7} Pa 前半程度まで劣化した状態においても電子銃部の真空度は 10^{-9} Pa 台に保たれる事が確認できた。暗電流についてはカソード側に $-20kV$ を印加した状態で $0.1 nA$ 以下に、 $-30kV$ を印加した場合 (最大電界 $7 MV/m$) でも数 nA に抑えられた。

透過光型フォトカソードと組み合わせたビーム試験では、量子効率が $1/e$ なるまでに $1.8 \times 10^8 C/cm^2$ の電荷を得ることに成功した。この電荷密度は他のグループで報告されている値と比べても十分に大きく、平均 $1\mu A$ の電流を連続的に生成した場合、20 時間で量子効率が 3 分の 1 に劣化する程度である。実際の運用においても (1 日数時間の利用)、レーザー光の照射位置を変えながら使用することで、最大 $1\mu A$ の電流を約 3 ヶ月の間 NEA 再活性化せずを得ている。また、同一のフォトカソードで 24 回以上の NEA 活性化を繰り返し 3 年以上の運転実績をあげている。

3. 透過光型フォトカソード

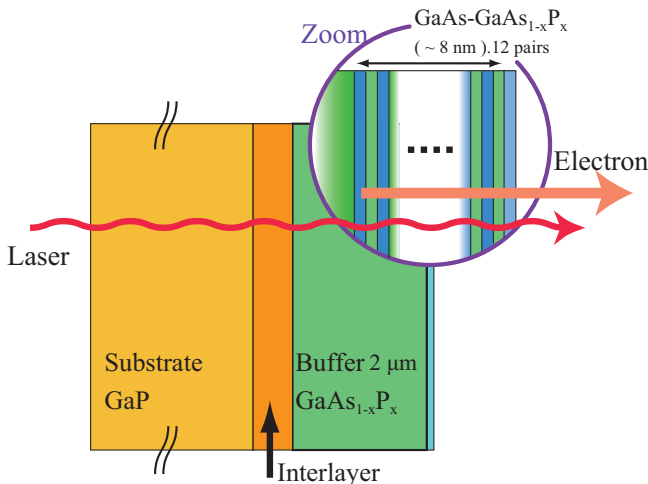


図 4: 透過光型フォトカソードの模式図

透過光型フォトカソードは名古屋大学工学部の有機金属気相エピタキシー (OMVPE) 装置により作製された。図 4 に透過光型フォトカソードの模式図を示す。透過光型フォトカソードの従来型と最も大きな違いは基板材料を GaAs から GaP に変更した点である。NEA-GaAs フォトカソードは基板の GaAs の表面を洗浄し、この清浄表面に NEA を付与することで得られていたため、従来型の歪み超格子薄膜はこの GaAs 基板上にバッファ層及び超格子層を成膜していた。しかし、この GaAs 基板はバンドギャップが超格子薄膜より小さいため超格子薄膜の励起レーザーを透過することができない、そこで我々は基板をバンドギャップの大きい GaP に変更することにした。

当初の開発においては GaP 上に従来と同じバッファ層及び超格子層を成膜したが、得られたスピン偏極度は 60% 程度と低く期待した性能を得られなかった。この原因は顕微鏡などを用いた計測の結果、GaP の格子定数が GaAs やバッファ層となる GaAsP の格子定数

より小さくバッファ層に加わる歪みの性質が従来型と異なっているからであると判明した^[5]。そこで、試験的に GaP 基板の上に中間層として GaAs を約 $500nm$ 成膜してからバッファ層及び超格子層を成膜し、このサンプルにおいて従来型と同じ $\sim 90\%$ の偏極度を得ることに成功した。この成功を受け、我々は試験的な中間層である GaAs (励起レーザーの約半分を吸収してしまう) を他の材料に変え高いスピン偏極度を維持したまま量子効率の向上を実現した。

現在、開発中の透過型フォトカソードはスピン偏極度 $\sim 90\%$ 、量子効率 0.4% を同時に得ることに成功しており、この値は従来型とほぼ同じ性能となっている。

4. まとめ

透過型フォトカソードと高輝度電子銃を開発し、これまでにスピン偏極度 $\sim 90\%$ 、量子効率 0.4% 、ビーム輝度 $\sim 2 \times 10^7 A \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1}$ 、ビーム寿命密度 $1.8 \times 10^8 C/cm^2$ を達成した。

今後、我々は透過光型フォトカソードの更なる量子効率向上を目指すと共に、未だ調べられていないパルス応答性などを測定する予定である。特にパルス応答性評価に向けて、名古屋大学において開発された $20kV$ 高輝度電子銃 3 号機、 $100kV$ 電子銃 (NPES2) を分子科学研究所 UVSOR に移設済みであり、現在準備を進めている。

5. 謝辞

本研究において大阪電気通信大学越川グループの方々には高輝度電子銃及び透過光型フォトカソードの開発時において利用者の立場から貴重なご意見を、また開発後には長期にわたり運用して頂くと共にその状況をフィードバックして頂き大変感謝しております。

分子科学研究所 UVSOR 施設長の加藤政博教授には高輝度電子源開発において UVSOR の利用を承諾して頂くと共に数多くのバックアップを頂き感謝しております。

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) により達成された。本研究の一部は日本学術振興会科学研究費若手研究 (B) No. 09008374、日本学術振興会科学研究費基盤研究 (C) No. 11007344 (財) 立松財団による助成 (いずれも代表者 山本 尚人) による。

参考文献

- [1] T. Nakanishi, *The XXI International LINAC Conference* (1998)
- [2] T. Nishitani, T. Nakanishi, M. Yamamoto, S. Okumi, F. Furuta, et al., *Journal of Applied Physics*, Vol. 97, No. 9, pp. 94907-94907 (2005)
- [3] N. Yamamoto, T. Nakanishi, A. Mano, Y. Nakagawa, S. Okumi, et al., *Journal of Applied Physics*, Vol. 103, No. 5, p. 064905 (2008)
- [4] F. Furuta, T. Nakanishi, S. Okumi, T. Gotou, M. Yamamoto, et al., *NIMe A*, Vol. 538, pp. 33-44, (2005)
- [5] X.G. Jin, Y. Maeda, T. Sasaki, S. Arai, Y. Ishida, et al., *Journal of Applied Physics*, Vol. 108, 094509 (2010)