

200keVスピンの偏極電子源の開発状況

山本 将博^{1,A)}、和田 公路^{A)}、中西 彊^{A)}、奥見 正治^{A)}、古田 史生^{A)}、西谷 智博^{A)}、
宮本 延春^{A)}、桑原 真人^{A)}、山本 尚人^{A)}、浪花 健一^{A)}、渡辺 修^{B)}、高嶋 圭史^{B)}、
小早川 久^{B)}、竹田 美和^{B)}、栗木 雅夫^{C)}、松本 浩^{C)}、吉岡 正和^{C)}

A) 名古屋大学理学研究科

B) 名古屋大学工学研究科

〒464-8602 愛知県名古屋市千種区不老町

C) 高エネルギー加速器研究所

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

我々は、リニアコライダー用電子源として200keVスピンの偏極電子源の開発を進めてきた。負の電子親和性 (Negative Electron Affinity) 表面を利用するこのGaAs型スピンの偏極電子源の最大の課題はフォトカソードの寿命であり、その長寿命化には電極間の電界放出暗電流の抑制と、超高真空の実現が不可欠である。200kV印加した状態での暗電流の抑制 (<1nA) には成功したが、現在のところ実用化のために必要な寿命 (~1000時間) を得るまでには至っていない。現在の寿命は残留ガスによるNEA表面の劣化によるものである。この対策として、 10^{-12} torrの真空度を実現するための装置改良を進めている。

また、NEA-GaAsフォトカソードは次世代放射光源に不可欠とされる超低エミッタンス (<0.5 mm·mrad) 電子ビーム生成の有力な候補である。超低エミッタンス電子源の基礎研究として200keVスピンの偏極電子源を使ったエミッタンス測定の準備を現在進めている。

1. はじめに

次世代リニアコライダーでは、超対称性粒子の探索の有力な方法としてスピンの偏極電子ビームの利用が想定されている。衝突点において高いルミノシティを実現するために電子源には、大ピーク電流 (>5A)、低エミッタンス (≤ 10 mm·mrad) のマルチバンチ構造をもった電子ビームが必要となり、これらの要求を実現するため「200keVスピンの偏極電子源」の開発を行ってきた¹⁾。

スピンの偏極電子はGaAs型半導体より生成される。GaAs結晶へ円偏光レーザーを照射することで価電子帯から伝導帯への選択励起が起こり、スピンの偏極した伝導帯電子がNEA表面を通して真空中へ取出されることでスピンの偏極電子ビームが生成される。

NEA表面を用いるフォトカソードは、量子効率が高く、金属フォトカソードに比べ励起レーザーの負荷を小さくすることができる利点がある。しかし、このNEA表面が非常に劣化しやすい欠点があるために実用化が難しく、これを解決することが大きな課題となっている。

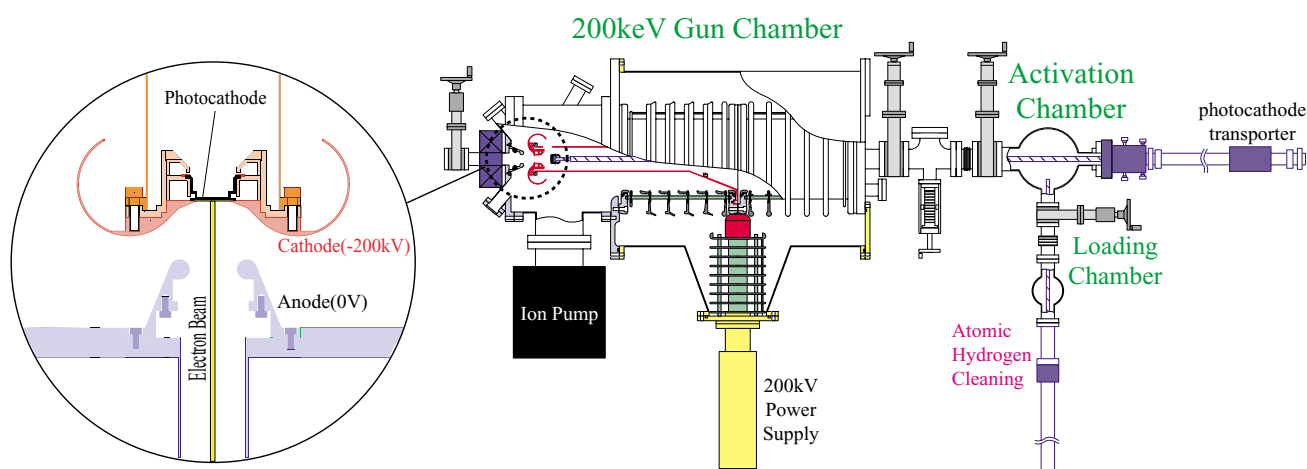


図1 200keVスピンの偏極電子源全体図

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

NEA表面の劣化は以下の過程によって起こると考えられている。

- H₂O, CO₂などの酸化性の残留ガスの吸着
- 電子ビーム - 残留ガス衝突によって発生するイオンのフォトカソードへの衝撃
- カソード電極から電界放出された電子が Chamber壁へ衝突し、そこから放出されるガスの吸着、及び発生するイオンの衝撃

これらの欠点を克服するためには、超高真空の生成（ への対策）、電界放出暗電流を抑えるための電極材料・加工法の選択・設計と仕事関数低下の防止（ への対策）が不可欠である。

2 . 200keVスピン偏極電子源^[2]

200keVスピン偏極電子源は、先に述べた対策を考慮し開発が進められてきた。図1に200keVスピン偏極電子源の全体図を示す。

2.1 ロードロック方式

200keVスピン偏極電子源は、ゲートバルブによって仕切られた3つのチェンバー（Gun Chamber, Activation Chamber, Loading Chamber）より構成され、マニピュレーターによって真空を破ることなくフォトカソードの着脱が可能となっている。

これによって、NEA活性化はGun Chamber外部で行え、活性化に使用するCsの電極表面への付着による仕事関数低下を防ぎ、高電界下での電界放出暗電流を抑制することを可能にしている。

2.2 加速電極

電極材料には不純物が極めて少ないステンレスNK-CleanZを使用し、電界複合研磨、超純粋洗浄による表面処理によって暗電流の原因となる微小突起や非金属性不純物の除去を行っている。

200kV印加時にはフォトカソード表面の電界強度は約3MV/mであり、この時の電極表面の電界強度は最大7.8MV/mに抑えられるよう形状設計がされている。これによって、ロードロックによる抑制効果とともに200kV印加時において電界放出暗電流は1nA以下に抑えることが可能となった。

2.3 超高真空

排気系については、超高真空下においても大きな排気速度を持つ非蒸発型(Non Evaporation Getter)ゲッターポンプ850l/s(GP500 ST707:saes getters)、希ガス排気も可能なイオンポンプ360l/s(PST400 AX :ULVAC)により構成されている。真空度の測定には10⁻¹¹torr以下においても測定可能なエクストラクター真空計(IE514:Leybold)を使用し、真空分析には残留ガス分析器(TH200:Leybold)を使用した。

装置全体は200、100時間のベーキングを行い、到達真空度2.3 × 10⁻¹¹torrを得ることができた。

3 . フォトカソード寿命測定

今回フォトカソードにはGaAs-GaAsP超格子結晶を用いた。この結晶は市販されているGaAs基板からレーザー切断によって必要なサイズの円形基板を作成し、この基板の上にMOCVD^[3]を用いて超格子を成長させた結晶である。この加工により、フォトカソード装着時の結晶へき開面からの電子放出を防ぐことが可能となった。

大気中からインストールしたフォトカソードはまず最初にLoading Chamberにおいて原子状水素による表面清浄化（～400 × 15min）を行う。その後、Activation Chamberで加熱洗浄（450 × 60min）を行う。この工程でNEA表面の形成を阻害する表面酸化物などが除去される^[4]。

表面清浄化後は、Cs蒸着・NF₃導入によるNEA活性化を行い、フォトカソードはGun Chamberのカソード電極へ装着される。励起レーザーにはHe-Ne(633nm)を使用した。フォトカソード表面でのレーザー径は約1mmである。-200kVをカソード電極に印加し、引出された電子ビームは約90cm下流の偏向電磁石により90°曲げられファラデーCupに導かれる。この時の移送効率は96%であった。

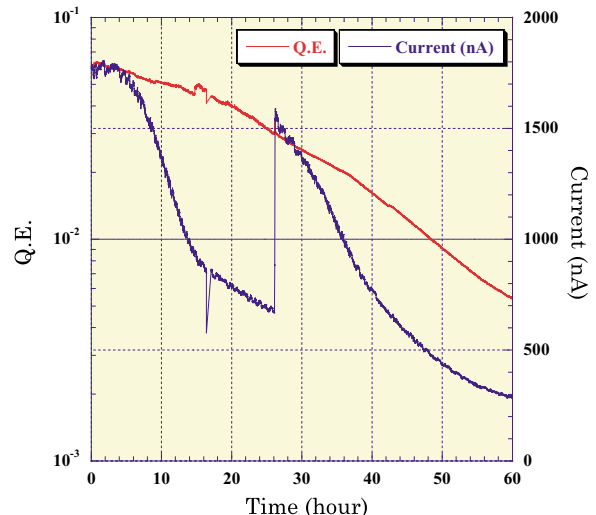


図2 引出し電流と量子効率の時間変化

フォトカソード装着時の量子効率は約6%であった。測定中はNEA表面劣化によってCurrent量が減少する。約26時間経過後にレーザー強度を上げることで電流量を増やし、1μA前後の出力で寿命測定を行った。図2にその結果を示す。

量子効率が1/eとなる寿命はおよそ40時間であった。このとき量子効率の低下は、電流量の変化にほとんど関係していない。さらに電圧印加、レーザー照射を量子効率測定時のみ行う”Dark Lifetime”測定においても同じような寿命特性が得られることから、現在直面している寿命問題は、残留ガスの影響によるものであると推測できる。

表1に寿命測定時の残留ガス分析結果を示す。大

部分は水素が占めているが、NEA表面に特に悪影響を及ぼすCO₂とH₂Oの分圧は合わせて全体の1割程度存在していることがわかった。

Total Pressure	2.3x10 ⁻¹¹ torr
H ₂	75.1%
CO	10.3%
CO ₂	8.0%
H ₂ O	3.6%
CH ₄	2.0%
その他	1.0%

表1 Gunチェンバーの真空度と残留ガス成分

NEA表面を劣化させるこれらの残留ガスを除去するために次に述べる方法で到達真空度を改善する計画を進めている。

4. 長寿命化に向けての対策

到達真空度は、排気速度とチェンバー壁からの単位時間あたりの放出ガス量によって決まる。

以下の対策を行うことで到達真空度の改善を図る。

バルブや測定子などの構成部品をより高温で使用できるものに変え、今まで行ってきた200ベーキングを~300で行うことによってH₂Oを排気し、放出ガス量を半分以下に抑える。

NEGモジュール(WP950 : saes getters)を8本設置することにより(図3)、NEGによる排気速度を現在の約5倍(~4300l/s)に改善する。

これらの対策により1桁以上良い超高真空の実現(~10⁻¹²torr)を目指している。

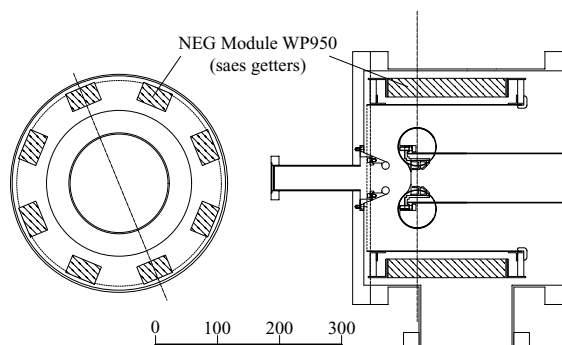


図3 NEG Moduleの設置図

5. 超低エミッタンス電子源

低エミッタンスビーム源は線形加速器利用に留まらず、近年、放射光源の分野での利用が特に期待されている。その中で、次世代の放射光源計画としてKEK・原研が進めているERL計画では、表2のような大平均電流で画期的な低エミッタンスを実現できる電子銃が求められている。

NEA-GaAsフォトリソドは、ビーム生成時の初期エミッタンスが小さく抑えられる可能性が指摘さ

れている^[6]。我々の電子源はまさにこれに該当する。この低エミッタンス実現性を確認する第一歩として、現在Pepper Pot方式によるエミッタンス測定実験の立上げをKEKと共同で進めている^[7]。

Voltage	500kV
Average Current	100mA
Bunch Charge	77pC
Bunch Length	20ps
Transvers Emittance	(norm,rms) <0.5 mm.mrad
Longitudinal Emittance (rms)	<4 keV.deg
Repetition Rate	1.3 GHz (CW)

表2 ERL計画に必要とされる電子源の性能^[5]

表2に示される超低エミッタンス電子源の実用化に向けて問題となるのはやはり寿命である。この要求を満たす実用的な電子源ははまだ実現されていない。以下に述べる2点は、容易ではないがこの電子源を実現のために行える対策である。

暗電流対策

空間電荷効果によるエミッタンスの増大を抑制するため、より高電圧・高電界下での電子ビームの引出しが不可欠となるが、電界放出暗電流は低く(<10nA)抑えなければならない。

そこで電流抑制効果が期待できるチタンやモリブデンを電極材料に採用することでこの問題を解決できると考えている^[8]。

イオンバックボンバードメント対策

電子ビーム・残留ガス衝突により発生するイオンの量はビーム軌道上の真空度と引出された電荷量の積に比例する。~10⁻¹²torr環境下で量子効率が1/eとなる引出し電荷量が約10⁴C/cm²と報告^[9]されており、これを元に平均電流100mAでの運転で見積もられる寿命は、30時間程度となる。寿命を延ばすためには、さらに良い超高真空の生成が不可欠である。

その対策として、10⁻¹²torr以下の究極的な真空を得るためには、チェンバー内壁にgetter作用を持つTi-Zr薄膜などを蒸着^[10]し、放出ガスを抑制する方法を考えている。

参考文献

- [1] T. Nakanishi et al., KEK Report 97-01 (1997) p.36-48
- [2] K. Wada et al., Proceeding 27th Linear Accelerator Meeting, (2002) p.166-168
- [3] O. Watanabe et al., AIP Conf. Proc 570 (2001) p.1024
- [4] C. K. Sinclair, AIP Conf. Proc 421 (1998) p.218-228
- [5] R. Hajima et al., Proceeding 27th Linear Accelerator Meeting, (2002) p.169-171
- [6] S. Pastuszka et al. J. Appl. Phys. 88 (2000) p.6788-6800
- [7] N. Yamamoto et al., this proceedings
- [8] F. Furuta et al., this proceedings
- [9] C. K. Sinclair, Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference, (1999) p.65-69
- [10] C. Benvenuti et al., Vacuum 71 (2003) p.307-315