

電界放出型フォトカソードを用いるスピン偏極電子源の開発

桑原真人^{1,A)}、中西 彊^{A)}、山口浩一^{B)}、三浦 健^{B)}、堀中博道^{C)}、奥見正治^{A)}、香月真澄^{A)}、和田公路^{A)}、古田史生^{A)}、西谷智博^{A)}、山本将博^{A)}、杉山陽栄^{D)}、宮本延春^{A)}、山本尚人^{A)}、浪花健一^{A)}、小早川 久^{D)}

A) 名古屋大学大学院 理学研究科 〒464-8602 愛知県名古屋市千種区不老町

B) 電気通信大学大学院 工学研究科 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

C) 大阪府立大学大学院 工学研究科 〒599-8531 大阪府堺市学園町1-1

D) 名古屋大学大学院 工学研究科 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町

概要

高輝度・低エミッタンスのスピン偏極電子源はリニアコライダーに必要不可欠であり、我々はすでにGaAs-GaAsP超格子フォトカソードなどの開発により高偏極度、マルチバンチビーム生成等に成功している。しかしこの偏極電子源はNEA表面を必須とするために常に寿命問題を抱えており超高真空や電界放出暗電流の削減に最先端技術が求められる。そこで、我々は別の可能性を有するものとして、NEA表面を必要としない方法の開発を開始した。それは、ニードル状の微小領域から電界放出機構を利用してビームを取り出すものである。その一歩として、まずピラミッド状GaAsからのレーザー励起・電子ビームの引き出しを試みた。その電界放出特性について報告する。

1. はじめに

我々は、GLC計画において重要な役割を果たす偏極電子源の開発研究を行ってきた。偏極電子の生成は、GaAs系半導体フォトカソードに円偏光レーザーを照射し、特定のスピンの電子を選択的に価電子帯から伝導帯へ励起する。この励起電子は拡散して、NEA (Negative Electron Affinity: 負の電子親和性) 表面より真空中へと引き出される。

GLC計画のようなりニアコライダーや高輝度のFEL (自由電子レーザー)、第四世代放射光源などでは、大電流で低エミッタンスの電子ビームが必要とされている。この実現のために、空間電荷制限効果を抑制し、電子を速やかに加速する必要がある。しかしながら、印加電圧を高めることでカソード電極より発生する電界放出暗電流が、アノード電極に衝突して不純物の放出を招く。これにより、イオンバックポンパードメントを起し、破壊されやすいNEA状態が劣化する。すなわち、NEA表面寿命問題を誘発する。

これを克服するために、本研究ではフィールドエミッションを利用することとし、フィールドエミッタとしてGaAs-FEAを用いる実験を行った。

FEAは、先端の尖ったニードル形状をしたものが数十 μm 間隔で配列したものである。そして、ひとつのニードルは数 μm オーダーの大きさであり、その先端曲率半径は数十nm~数nmという小さな構造を持ったマイクロデバイスである。電界の集中は先端部で最大になり、その先端曲率半径が小さいほど電界が強くなっていく。この電界により、先端の非常に狭い領域から大きな電流密度のビームを引き出すことができる。GaAsで作られたFEAに、円偏光レーザーを照射してニードル先端から電子を真空中に引き出せば、偏極したビームでかつビームの断面積も小さいものができるはずである。すなわち、低エミッタンスビーム生成の可能性を示している。FEAは電界で引き出すためPEA (Positive Electron Affinity) 表面からでも電子の引き出しができる。これにより、NEA表面寿命問題が回避できると考えている。

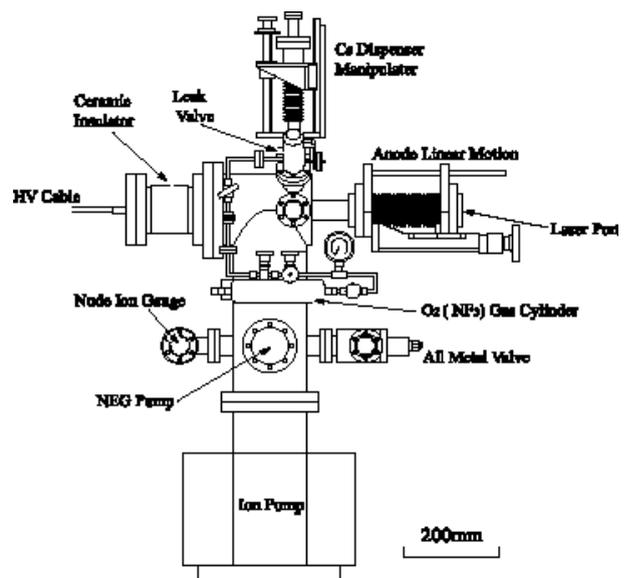


図1: FEA用高電界印加装置の全体図

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

2. 装置

図1に、この実験に使用した装置を示す。

この装置は、励起レーザー光をフォトカソードに垂直入射して、カソード表面中心部に高電界を印加し、電子ビームを引き出す構造をとっている。装置は超高真空にした状態で、フォトカソード表面をアニールにより洗浄できる。また、カソード

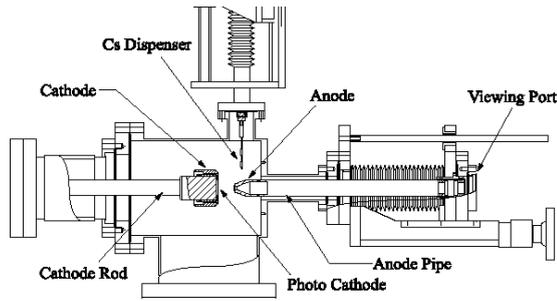


図2：装置の電極周辺断面図

の真空準位を下げるCsとO₂ (NF₃) 添加も可能である (NEA表面作成可能)。

2.1 高電圧印加部 (電極)

フォトカソードとアノード電極間の距離は可変である。電極形状の決定には、シミュレーションコードEGUNにより電極間距離5mmのときのビーム軌道計算を行い、且つ電界計算コードPOISSONにより電極表面電界を計算した。この計算により、暗電流の要因となる過度の高電界が電極表面にかからないように最適な電極形状を決定した。電極作成では、電極材料として炭素含有量が少なく真空特性が良いステンレス鋼SUS316Lを使用した。これは電極特性においても良い結果が得られているものである。超精密NC旋盤により切削後、電解複合研磨を施すことにより表面処理を行った。



図3：カソード・アノード電極 (研磨後)

フォトカソード結晶は、ヒーター付きのMo製ロッドに装着し、Taのキャップにより固定する。その上よりカソード電極を付ける構造になっている。

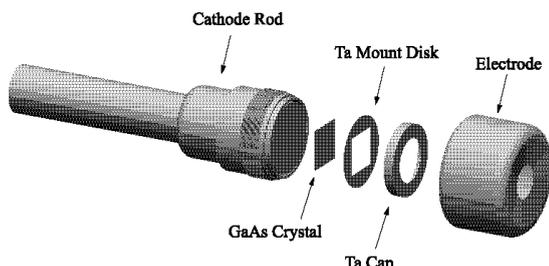


図4：カソード部品構成

る。

アノード・カソード間電

圧20kV (セラミックスの耐圧) 下で、電極間距離を変えたときの暗電流測定を行った。カソードに、Cs付加前後で電界特性を測定した結果、付加前は暗電流がgap2mm以上で0.1nA以下、付加後はgap3.2mm以上で0.1nA以下であった。図5にその結果を示す。よって、この装置では印加電界強度を4.8MV/m (@20kV,gap3.2mm) までかけることができる。

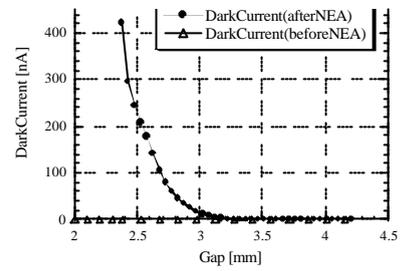


図5：電極の電界特性 (@20kV印加)

2.2 超高真空

超高真空生成のため、装置全体をボックスに入れ、200℃で50時間ベーキングを行った。スパッタイオンポンプおよびNEGポンプを併用して本排気を行った。その結果、真空度は 6×10^{-9} Paの超高真空を得ている。また、この真空度は清浄なNEA表面の作成・維持も可能にしている。

2.3 その他

Cs供給にはSAES-getters社のCs-Dispenserを使用した。O₂またはNF₃は本体についたパリアブルリークバルブ (10⁻⁹Pa台のリーク量調整可能) により真空容器内に導入する方式をとった。

励起光源はTi:Sapphire CWレーザーを使用した。Ti:Sapphireレーザーは、励起光5W (@532nm)にて波長730nm~950nm、パワー550mW (@820nm)を出力するものである。このレーザー光を、マルチモード光ファイバーで装置手前まで輸送する。レンズで絞り、グラントムソン偏光子、1/4波長板を通すことで、円偏光にしている。ビューイングポートを介して真空中に入射し、結晶表面に照射する。

3. フォトカソード

結晶基板は、中央部分にニードル領域が存在する構造になっている (図6左)。ニードルはそれぞれ、20μm間隔で配列されている (図6右)。

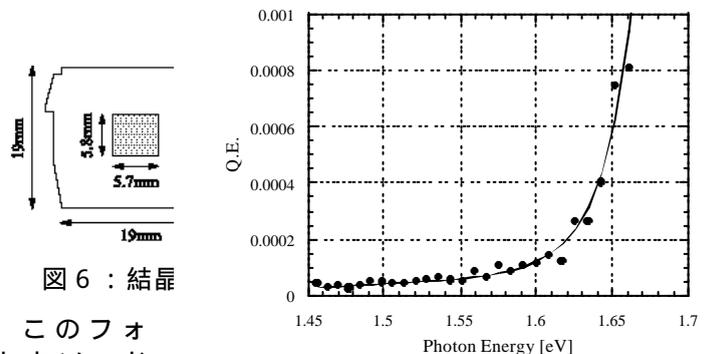


図6：結晶

このフォトカソードは以下の工程により作

成される。ニードル領域を作るため、初めに中央部以外をエッチングにより削り落とす。その後ニ-

図8：光電流の励起エネルギー依存特性

ドルを作成する。作成方法は、レジストをスピコートさせた上にレジストパターンマスクをし、露光させる。次に現像を行い、エッチングパターンの膜を基板表面に焼き付ける。リン酸系エッチャントによりウェットエッチングを行い、ニードル形状を得る。これは、異方性エッチングであり、形状はピラミッド型になる^[1]。ここで、結晶基板にはp型GaAs (Znドープ $\sim 2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$) を使用している。なお、今回使用した結晶は、電気通信大学電子工学科の山口研究室にて作成したものである。

4. 測定と結果

4.1 フォトカソード表面処理

GaAs-FEA 結晶はHCl飽和イソプロパノール溶液リンス^[2]により酸化膜除去を行い、装置にインストールする。超高真空下で結晶の加熱洗浄 (550 で1時間) を行い、結晶表面を清浄な状態にした。

4.2 電界-電流特性の測定と結果

高電界印加装置で最大電界を印加したが、光電流は観測されなかった。そのため、Cs付加により真空準位を下げつつも、PEA表面状態で測定を行っている。図7に結果を示す。

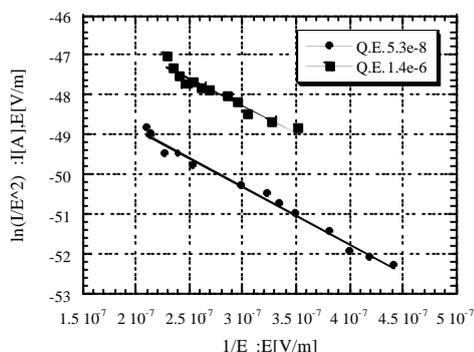


図7：光電流の電界特性 (F-Nプロット)

この図には、量子効率 (Q.E.) の違う二つのサンプルを示した。いずれのサンプルにおいても高電界印加の下では、F-Nプロットにおいて右下がりの直線にのる結果を得た。この結果から光電流が電界放出により引き出されていることが分かる。

4.3 量子効率の波長依存測定の結果

量子効率のレーザー波長依存について測定した。図8に結果を示す。測定は-20kV印加、gap=5.34mmの高電界印加状態 (約2.9MV/m) を一定に保ったまま、レーザー波長を変えていった。図8は横軸に励起光子エネルギーをとり、縦軸はQEを示し、実線はWKB近似により求めたトンネル確率の関数でフィットされた曲線である。測定結果は、高電

界による表面トンネル確率のエネルギー依存を示すことがわかった。ニードル形状を持たないGaAs表面のPEA状態では、今回の結果のような1.6eV付近の急激な変化は起こさない。従って測定結果は、励起電子が真空障壁を越えた事による増加ではなく、トンネル効果によるものであることを示している。

5. まとめと今後の方針

この実験は、GaAsニードルからの励起電子を電界放出により引き出すことが可能であることを示した。今後さらに、偏極度測定を行い、引き出し電子ビームが偏極した状態であることを確認し、減偏極効果がどれだけののかも測定する予定である。

今回はCsの付加により真空準位を引き下げたPEA状態にしなればならなかった。これは、形状因子による電界増倍効果がまだ不十分であることを示している。ニードル形状からシミュレーションにより求めた電界増倍係数は8であった。ところがCs付加を用いないフィールドエミッターとしては100以上の増倍係数が必要と推測される。

このため、現在われわれはGaAsニードルにカーボンナノチューブ (CNT) をつけ、その先端より偏極電子を取り出す試みを開始している。これは、CNTの高アスペクト比を利用して、電界増倍効果を高めるものである。この手法には、CNT中のスピン輸送現象の解明や、GaAsとCNTの接触抵抗の軽減など未解決の課題は多いが、将来的には大変興味あるものである。

参考文献

- [1] K.Yamaguchi and S.Tada : “ Fabrication of GaAs Microtips for Scanning Tunneling Microscopy by Wet Etching “, J. Electrochem. Soc., Vol.143, No.8 (1996) pp.2616-2619
- [2] O.E.Tereshchenko, ”Composition and structure of HCl-isopropanol treated and vacuum annealed GaAs(100) surfaces”, J.Vac.Sci.Technol.A 17(5)