

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2015

課題番号：24654054

研究課題名(和文) 超高輝度・高偏極RF電子銃開発

研究課題名(英文) Development of RF gun producing high intensity and polarized electron beam

研究代表者

柏木 茂 (Kashiwagi, Shigeru)

東北大学・電子光理学研究センター・准教授

研究者番号：60329133

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：高周波電子銃に偏極電子ビーム生成が可能なNEA-GaAsカソードを導入するには、その脆弱性を克服することが大きな課題である。NEA表面は超高真空が必要であるので、真空排気システムが增強可能なDAW型高周波電子銃空洞を設計した。また一方、Cs-Oによる従来の表面修飾法ではなくCsTe薄膜をGaAsカソード表面に形成することにより、NEA表面が生成できることを実験的に確認した。扁平ビーム生成については、シミュレーションによりカソード表面に縦方向磁場を適切に作り出すことによりビームに角運動量を与えスクュー四極電磁石を使うことで扁平ビーム生成が可能であることシミュレーションにより明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have developed a photocathode RF gun with DAW structure type to generate an extremely low emittance and spin polarized electron beam. NEA-GaAs cathode is used for generation of spin polarized electron beam, NEA-GaAs has a vulnerability issue and it requires an ultra-high vacuum level. It has confirmed that it is possible to install the additional vacuum pumping system to the DAW type of RF gun system without reducing the Q-value of cavities. On the other hand, to overcome a vulnerability issue of NEA surface, we evaporated CsTe semi-conductor thin film on GaAs surface and obtained a result which suggest NEA surface on GaAs wafer. This could be another technique for the NEA activation with Cs-O/F. To make the high aspect ratio of the beam shape, the X-Y emittance exchange technique is employed for RF gun system. We have performed tracking simulation for KEK-STF beam line. We established the emittance exchange method by using solenoid magnet and a set of skew quadrupole magnets.

研究分野：加速器科学

キーワード：電子ビーム 低エミッタンス 偏極ビーム エミッタンス交換

1. 研究開始当初の背景

高い偏極度をもちかつ超低エミッタンスの電子ビームは国際リニアコライダー (ILC) の電子源として期待されているのをはじめ、様々な応用分野においてその実現が期待されている。現在の ILC の設計では、偏極度 80% 以上でエミッタンス 10^{-5} m-rad オーダーの電子ビームを直流 (DC) 電子銃で発生させ、それをダンピングリング (以下、DR) での放射減衰の効果により、低エミッタンスかつ高扁平率の電子ビームを作り出す。($\gamma_{ex} = 10^{-5}$ m-rad, $\gamma_{ey} = 4 \times 10^{-8}$ m-rad) こうした高品質電子ビームをダンピングリングを使わずに電子銃で直接生成することができるになれば、DR だけでなくスピローテータなども不要になり、タイミングシステムについては格段に簡略化が図れる。また、偏極電子源は NEA (Negative Electron Affinity) 表面をもつ陰極の開発を中心に行なわれており、これまでに名古屋大学のグループなどで 90% を超える高い偏極度が達成されている。しかし、NEA 表面は超高真空を必要とするため、偏極電子ビームの引き出しはこれまで直流電場の引き出ししか行われてきていない。超低エミッタンスビーム生成には空間電荷効果によるエミッタンス増大を抑制するために高い引き出し電場が必要であり、それを達成するためには高周波電子銃の導入が必要である。しかし、偏極電子ビームを生成することができる NEA 表面をもつ光陰極を高周波電子銃に導入することは真空度の関係から不可能とされてきた。扁平ビーム生成についてはこれまで独国や米国で提案が幾つかなされており、米国のフェルミで試験的なビーム実験が行なわれたが、これらはいずれも無偏極電子ビーム生成であった。

2. 研究の目的

本研究では高周波電子銃の高周波空洞構造に DAW (Disk-And-Washer) 型を採用し、真空排気システムを強化できる形状とすることにより従来の高周波電子銃では不可能とされてきた超高真空度が達成できる高周波空洞を設計、試作する。電子源である陰極には、超低エミッタンスかつ高偏極度電子ビームの生成が可能な NEA 表面の GaAs 結晶を用いる。また、RF 電子銃により生成された超低エミッタンスビームを特殊ビーム光学システムを使い、垂直・水平エミッタンス比が 2 桁以上異なる高扁平ビームが生成可能であることを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 偏極・低エミッタンス電子ビーム生成が可能な DAW 型高周波電子銃について設計および試作を行なう。DAW 型の高周波空洞は 1970 年頃より製作が行なわれてきているが、その構造が複雑であるためあまり開発が行なわれてこなかった。近年、電磁場解析コードの発展などにより、その特長を活かすべく

開発が行なわれるようになってきた。RF 電子銃にこの DAW 構造を取り入れた例は少なく日本では東京理科大学の自由電子レーザー施設の電子銃に採用されているだけである。DAW 型空洞は加速区間と非加速区間であるドリフトチューブ内の通過距離を自由に調整することができ、また空洞の表面電界を抑えて加速電場勾配を大きくすることが可能である。そして、DAW 型空洞の特長の一つに低エミッタンス化が可能であることが挙げられる。電子ビーム軌道に平行な加速電場を加速区間に生成することができ、動径方向電場を殆どビームは感じずに加速されるためエミッタンス増大が生じにくい。また、セル間の結合が大きいため共振周波数などの調整も容易であり、また真空の排気ポートを空洞外壁に増設しやすいといった利点がある。本研究では高周波空洞への RF 供給には導波管-同軸変換を用いることとした。その理由は、真空の排気ポートをレギュラーセル外壁に設けたいと考えたためである。今回の設計は、前述した東京理科大学が製作した DAW 構造高周波電子銃を参考に設計を進めることとした。

(2) NEA-GaAs カソードの表面は、表面修飾に用いられる Cs-O の Cs の熱脱離、残留ガス吸着、イオンバックボンバードメントなどの効果により、フォトカソードとしての性能が劣化することがこれまでの研究で解っている。一方、GaAs 表面に Cs-Te を蒸着した場合、NEA 状態が得られる可能性が指摘されている。Cs₂Te 半導体は比較的高耐久なフォトカソードとして知られており、本研究では NEA-GaAs の高耐久化のために、従来の Cs-O による GaAs 表面修飾によって NEA 活性化する手法に替え、CsTe を使用し高耐久性をもつ NEA 表面を作り出せるか試験した。

(3) 超低エミッタンスかつその垂直・水平のエミッタンス比が大きい扁平電子ビームを生成するため高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の超伝導加速空洞試験施設 (STF) のビームラインを仮定し、ビームトラッキングシミュレーションを行った。

4. 研究成果

(1) 低エミッタンスかつ NEA-GaAs カソードの脆弱性を克服するために真空排気を強化できる DAW 型高周波電子銃の設計を行なった。これまでの DAW 型高周波空洞のレギュラーセルは、ディスク部とワッシャー部を別々に製作しそれらを支柱 (サポート) でロウ付け接続する製作方法がとられてきたが、近年の加工技術の進歩によりディスク部とワッシャー部、支柱部を 1 つのパーツとして精密加工し、それらをロウ付けして接続する空洞製作方法をとることを想定して設計した。

本研究で電磁場計算した空洞形状を図 1 (上) に示す。高周波は S バンド (共振周波数 2856MHz) とした。高周波空洞はカソードセ

ルと3つのレギュラーセルで構成され、高周波の入力にはドアノブ型の導波管・同軸変換構造を使用した。結合度の調整のためドアノブ結合器先端のノーズ部付近にはスロットを設けた。図1(下)には導波管と空洞内の電界分布を示す。空洞製作を容易にするために、3つのレギュラーセルの空洞形状は同じとし、ワッシャーのノーズ部分に作り出される電界強度(バランス)は一定になるようにした。実際には高周波の入力パワーを仮定し、電子ビームの走行時間からワッシャーのノーズ間距離や電界分布のバランスの最適化を図る。この調整はDAW型空洞の場合非常に容易できるといった特長もある。今回設計した高周波空洞のQ値は約8500であった。また、排気ポートを設けることを想定しレギュラーセルの外壁およびカソードセルの側面壁にスロットを設けたが、Q値が低下することはなかった。これによりイオンポンプやNEGポンプを空洞近傍に設置することが可能になった。イオンポンプの漏れ磁場がビームに与える影響など更に詳しい調査が必要ではあるが、DAW型空洞を採用することにより真空排気を増強することが可能であることを明らかにすることができた。

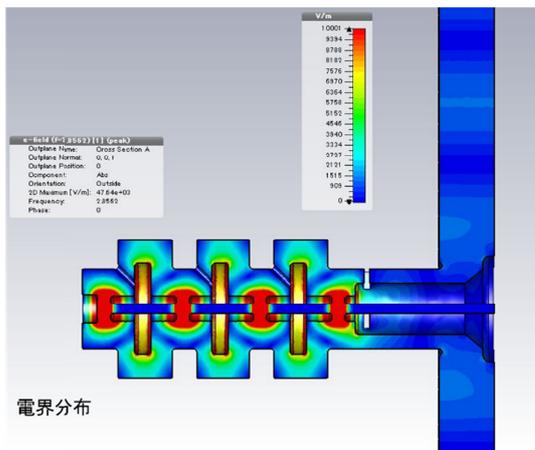
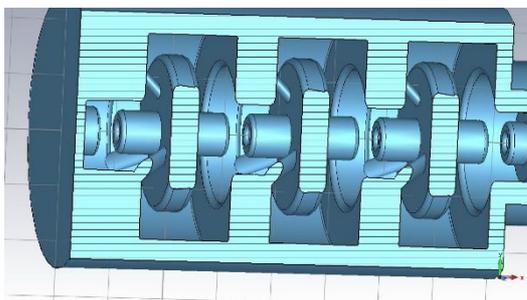


図1 (上)DAW型高周波電子銃空洞形状空洞形状と(下)空洞および導波管結合部の電界分布。

(2) スピン偏極電子源として実績のあるNEA-GaAs光陰極はRF電子銃での使用にはCs-OによるNEA表面の脆弱性を克服することが課題である。ヘテロ接合モデルによると、仕事関数がGaAsのエネルギーバンドギャッ

プよりも小さい物資をGaAs表面に薄膜接合すると、実効的なNEA表面が形成されることが予測される。そこで本研究では、高い耐久性が知られているCs-Te薄膜をGaAs上に生成し、光電子生成を試みた。光電効果の量子効率を光の波長の関数として測定したところ、GaAsのエネルギーバンドギャップに相当する1.4eVにおいて有限の量子効率が観測され、Cs-Te薄膜によるGaAsのNEA活性化に成功したことが示された(図2)。これにより、ヘテロ接合による実効的なNEA表面の形成が可能であることが実証された。今後、RF電子銃実機にCs-Te NEA GaAsカソードを装着し、量子効率および耐久性の評価を進めるとともに、より適切な表面薄膜の探索も並行して実施していくことで、高耐久スピン偏極電子源の実現が見込める。

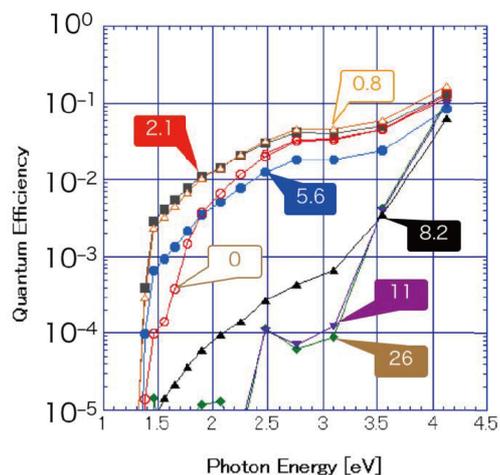


図2 異なるTeの膜厚の量子効率スペクトル(ラベル数値の単位はオングストローム)

(3) KEK-STFではCs-TeをフォトカソードとするLバンド高周波電子銃を電子源としている。また、扁平ビーム生成に必要な水平・垂直方向運動量を結合させるためのソレノイド電磁石システムが付属している。本来、このソレノイド電磁石は空間電荷効果によるエミッタンス増大を抑制するために設置されたものである。このLバンド高周波電子銃とソレノイド電磁石は研究代表者の柏木がSTF加速器システム立上げの際に製作したものである。シミュレーションを行った電子ビームラインの概略図を図3に示す。高周波電子銃の外側にはソレノイド電磁石が設置されており、カソード表面に有限のz方向磁場を生成することにより、ビームに水平垂直方向に結合した運動量を与える。ソレノイド電磁石はメインコイルと補正コイルの2つの部分から構成されており、補正コイルに流す電流量を調整することによりカソード表面磁場強度を調整することが可能である。次に、高周波電子銃により生成された電子ビームは3台のスクュー四極電磁石を用いる事により水平垂直方向に結合した運動量を水平・垂直方向にそれぞれ分離する。実際のビ

ームラインには偏向電磁石 4 台で構成されるシケインが設置されており、この中間部分よりフォトカソードに対して垂直にレーザーが入射される構成になっている。

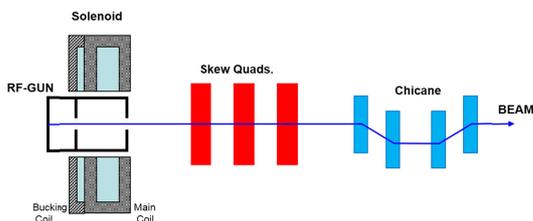


図 3 KEK-STF ビームラインセットアップ

扁平ビームに変換された後の水平垂直エミッタンスは以下の式で表すことができる。

$$\epsilon_{\pm} = \sqrt{(\epsilon_0)^2 + (L^*)^2} \pm L^*$$

ここで ϵ_0 は初期エミッタンスである。また、 L^* はカソード表面磁場(B_0)によって与えられるビームの規格化角運動量でありビームサイズ(σ)などにより $\beta\gamma(eB_0\sigma^2/\pi mc)$ で表すことができる。もし、規格化角運動量が初期エミッタンスに対して大きいならば($L^* \gg \epsilon_0$)、扁平ビームに変換された後のエミッタンス比(η)は、 $\epsilon_+/\epsilon_- \sim L^*/\epsilon_0$ で表すことができる。高周波電子銃の電場勾配: 69 MV/m、ソレノイド磁場強度: 0.4 T、初期エミッタンス: 2×10^{-6} m-rad とし、シミュレーションを行なった結果を図 4 に示す。ILC の要求である水平垂直エミッタンス比が 250 には及ばなかったがエミッタンス比が 63 のビーム生成が可能であることを確認した。今回は上記の初期パラメータを用いて計算を行なったがカソード表面磁場の最適化、カソード上でのレーザースポットサイズ(初期ビームサイズ)を調整することにより、ILC スペックの高扁平電子ビーム生成は可能である。

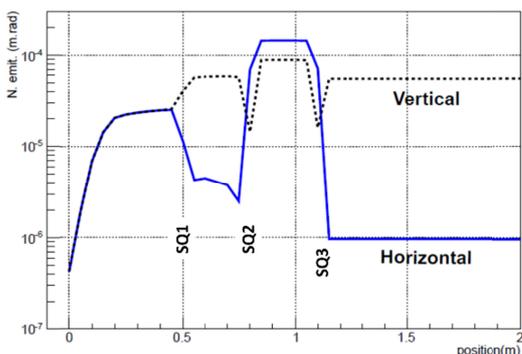


図 4 ビームラインに沿った水平・垂直エミッタンスの変化

最終的に本研究では、空洞 Q 値を下げることなく真空排気システムの増強が可能な DAW 型高周波電子銃を設計した。偏極電子ビーム生成には NEA-GaAs カソードが必要であるが、この NEA 表面は脆弱であり超高真空を必要とする。本研究で設計を完了した DAW 型高周波電子銃空洞は超高真空を実現でき、NEA-GaAs カソードの高周波電子銃への導入の可能性

を高めた。偏極電子ビームの生成が可能である GaAs カソードの開発では、これまでに高周波電子銃で使用実績のある CsTe 薄膜を GaAs カソードの表面に形成することにより NEA 表面を生成できることを実験的に確認した。この結果は、Cs-O/F による表面修飾法以外の可能性を大きく広げるものであった。扁平ビーム生成については、STF の超伝導空洞開発スケジュールとの折り合いがつかずビーム実験には至らなかったが、シミュレーションによりカソード表面に縦方向磁場を適切に作り出すことによりビームに角運動量を与えスクー四極電磁石を使うことにより扁平ビーム生成が可能であることをシミュレーションにより明らかにすることができた。

< 引用文献 >

T. Nishitani, T. Nakanishi, M. Yamamoto, S. Okumi, F. Furuta, et al., J. Appl. Phys. **97** (9) (2005) 94907.

P. Piot, Y.-E. Sun, K.-J. Kim, PRSTAB **9** (2006) 031001.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

“GaAs Photocathode Activation with CsTe Thin Film”, Masao Kuriki, Yuji Seimiya, Kazuhide Uchida, Shigeru Kashiwagi, Proc. of IPAC2015, pp.1567-1569. 査読無 ISBN 978-3-95450-168-7

“Study of Femtosecond Electron Bunch Generation at t-ACTS, Tohoku University”, S. Kashiwagi, H. Hama, F. Hinode, A. Lueangaramwong, T. Muto, I. Nagasawa, S. Nagasawa, K. Nanbu, Y. Shibasaki, K. Takahashi, C. Tokoku, N.Y. Huang, Proc. of LINAC2014, pp. 1178-1171. 査読無 ISBN 978-3-95450-142-7

“1 ms Pulse Beam Generation and Acceleration by Photocathode Radio Frequency Gun and Superconducting Accelerator”, Masao Kuriki, Hokuto Iijima, Seiichi Hosoda, Ken Watanabe, Hitoshi Hayano, Junji Urakawa, Goro Isoyama, Ryukou Kato, Keigo Kawase, Ayaka Kuramoto, Shigeru Kashiwagi, and Kazuyuki Sakaue, Jpn. J. Appl. Phys, **52** (2013) 056401-1-7. 査読有 doi: 10.7567/JJAP.52.056401

[学会発表] (計 5 件)

「位相空間回転によるマイクロバンチ構

造の生成とその応用」栗木雅夫, 根岸健太郎, 清宮裕史, 加藤龍好, 大見和史, 浦川順治, 柏木茂、第 71 回日本物理学会年次大会, 2016 年 3 月 (東北学院大学、仙台市) 19aAQ-3

「進行波加速構造中における速度集群法を用いた極短パルス電子ビーム生成」柏木茂, 永沢聡, 日出富士雄, 齊藤寛峻, 武藤俊哉, 柴崎義信, 南部健一, 高橋健, 長澤育郎, 東谷千比呂, 濱広幸、第 70 回日本物理学会年次大会, 2015 年 3 月 (早稲田大学、東京都) 22pDE-1

「CsTe 薄膜による GaAs カソード活性化」栗木雅夫, 内田和秀, 清宮裕史, 柏木茂、第 70 回日本物理学会年次大会, 2015 年 3 月 (早稲田大学、東京都) 22aDE-9

「マグネタイゼーションによる高アスペクト比電子ビームの生成」栗木雅夫, 柏木茂, 早野仁司、第 68 回日本物理学会年次大会, 2013 年 3 月 (広島大学、東広島市) 26aBA-10

「KEK-STF における高アスペクト比電子ビームの生成」栗木雅夫, 柏木茂, 早野仁司、第 10 回日本加速器学会年会 (2013) (名古屋大学、名古屋市) SAP009

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柏木 茂 (KASHIWAGI, Shigeru)
東北大学・電子光理学研究センター・准教授
研究者番号: 60329133

(2) 研究分担者

日出 富士雄 (HINODE, Fujio)
東北大学・電子光理学研究センター・准教授
研究者番号: 60292207

栗木 雅夫 (KURIKI, Masao)
広島大学, 先端物質科学研究科, 教授
研究者番号: 80321537