

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02898

研究課題名(和文) 高耐久GaAsカソードと位相空間回転による超扁平スピン偏極電子ビームの直接生成

研究課題名(英文) Super-flat spin-polarized electron beam generation from a robust GaAs cathode by 6 dimensional phase-space rotation

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円

研究成果の概要(和文)：リニアコライダーのためのエミッタンス交換による非対称ビームの生成について研究をすすめた。その結果、カソード近傍の非線形空間電荷効果によるエミッタンス増大のため、所定の非対称ビームの生成はそのままでは困難なことが明らかとなった。空間電荷効果の緩和のために初期ビーム径を大きくし、xy交換によりyエミッタンスを極小化する手法をあらたに提案した。本方式ではxエミッタンスが過大となるが、xz交換を導入し、過大なxエミッタンスをz方向に押し付けることで解決する。zエミッタンスに対する制限は極めて緩く、問題とならない。本提案は、2020年度からのあらたな研究計画としてスタートした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、単純なxy交換によるリニアコライダーのためのビーム生成には困難があることがあきらかとなった。一方で、xy交換に比べ、xz交換を加える手法の提案につながった。新手法は旧手法で問題となった課題の克服が期待でき、リニアコライダーのためのビーム生成が可能になると期待される。これにより、加速器の構成が大幅に単純化され、コスト低減、工期の短縮、運転の単純化、など社会的、技術的、科学的メリットが期待される。

研究成果の概要(英文)：We studied x-y asymmetric beam generation for linear colliders by phase-space rotation technique. According to our result, the non-linear space charge effect is critical and causes a significant emittance growth. To prevent this problem, we propose a new method additional introducing xz emittance exchange. In this method, the beam is generated with a large spot size to prevent the non-linear space charge effect. Although a tiny y emittance is obtained by xy rotation, but the x emittance becomes too large. The large x emittance is exchanged with z-emittance by the emittance exchange technique. The study of the new proposal has been started from 2020 JFY.

研究分野：加速器科学

キーワード：リニアコライダー 入射器 エミッタンス交換

1. 研究開始当初の背景

国際リニアコライダーは、線形加速器による重心系250GeV-1000GeVにおける電子・陽電子衝突型加速器(コライダー)であり、ヒッグスセクターの詳細研究、超対称性粒子の探索、余剰次元やダークマターなど素粒子の標準模型を超える物理の探求により、時空の構造や宇宙の成り立ちに迫る国際プロジェクトである。2013年にこれまでの研究開発成果をまとめた技術設計報告書[1]が出版され、2016年の当時、文部科学省や学会などによる検討が本格化するなど、実現にむけた検討が進められていた。2018年に出された学会の検討委員会の結論は積極的なものではなかったが、2019年の文部科学省における国際的な検討状況を注視するとの声明、2020年の事実上の国際交渉のスタートなど着実な進展がみられる。そもそも、シンクロトロン輻射によるエネルギーロスにより200GeVを超える従来型の円形加速器での電子・陽電子衝突は実現が極めて困難であり、ILCを含む線形加速器による高エネルギー電子・陽電子コライダーの実現はこれからの素粒子物理研究の試金石となるものである。

リニアコライダー実現の鍵は、低いビーム電流による高いルミノシティの実現に集約される。線形加速器ではビーム電流が消費電力に比例するため、従来のようにビーム電流を増やすことでルミノシティを高くするという方針では、電力消費が莫大となり、現実的ではない。衝突点付近でのビーム同士の電磁相互作用による不安定性を回避し、かつルミノシティを最大化する設計として、50 μ Aという、リングコライダーに比べて桁違いに小さい平均ビーム電流で、極小・非対称形状による衝突により高いルミノシティを実現する案が当初より提案されてきた。その大きさはビームの進行方向に対して、横水平方向(xとする)1 μ m, 横鉛直方向(yとする)5nmとである。このような非対称ビームを大きな非対称性をもつ光学系で実現することは困難であり、極小・非対称ビームの実現には、非対称エミッタンスのビームが必要である。その数値はx方向10mm.mrad, y方向0.04 mm.mradと250倍もの非対称性となる。

2. 研究の目的

図1. にしめすように、現在の国際リニアコライダーの設計案においては、入射部で作られた偏極電子ビームは、いったん周長3.1kmのリング(Damping Ring)におよそ200ms蓄積し、x方向10mm.mrad, y方向0.04 mm.mradという250倍もの非対称性をもったビームとなる。本研究の目的は、このような大きな非対称性をもったビームをエミッタンス交換の手法を用いて、直接入射部により生成することにある。エミッタンス交換とは、異なる自由度間(この場合は水平方向と鉛直方向)でエミッタンスを振り分けることである。エネルギー散逸を伴わないビーム輸送においては、ビームの占める六次元位相空間の体積は保存量であり、適切な自由度間の結合によりビームの

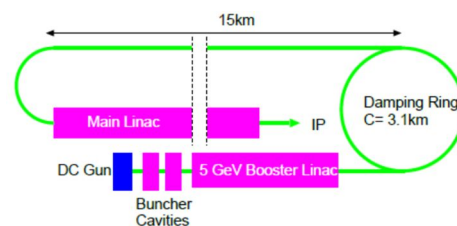


図 1 . ILC の現行設計案。生成された電子ビームはいったん 3.1km の DR に蓄積され、その後主加速器に送られる。

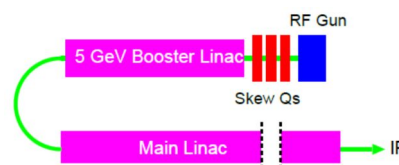


図 2 .本研究が提案する ILC の設計案。入射部で非対称ビームを生成し、そのビームを直接主加速器に送り込む。

六次元位相空間の形状を変更することが可能である。その際、結果として各自由度における位相空間（二次元空間となる）に粒子を射影した分布（面積、エミッタンス）を操作することが可能である。P. Piotら[2]はソレノイド磁場中でビームを生成し、発生した角運動量をxy結合を生じるように設置した四重極磁場を通過させることで、xy方向に対称に発生させたビームから大きな非対称性が生成できることを理論的に示し、実験的に検証した。本研究の目的は、図2. に示すように、この手法をリニアコライダーで必要となる極小非対称エミッタンスビームの生成に適用することの妥当性を、理論的および実験的に検証することである。

3. 研究の方法

線形力学の範疇において、提案されている手法はトリビアルなものであり、疑問の余地は無い。本手法の妥当性検証において問題となるのは、様々な非線形現象の影響の評価である。それを行うため、実験的および理論的両面からの検討をおこなうこととした。実験的な検討としては、茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構に設置されている STF 加速器（Superconducting Test Facility, 超伝導加速器試験施設）を利用し、xy エミッタンス交換の原理的

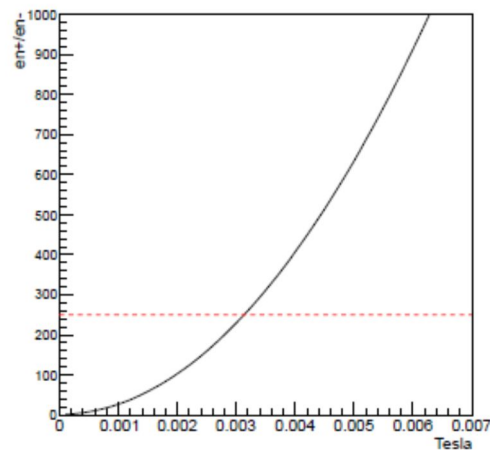


図 3. 横軸にカソード上の磁場をとり、縦軸に xy のエミッタンス比を示す。

を実証試験および空間電荷を中心とする非線形現象の評価を行うこととした。STF には L-band の RF 電子銃が設置されており、表面電場にして 30MV/m 程度の電場を発生できるとともに、陰極近傍における空間電荷効果によるエミッタンス増大の抑制のため、収束用のソレノイド磁場を発生できるようになっている。陰極上にソレノイド磁場が存在すると xy 相関（角運動量）が発生し、x および y エミッタンス（二次元位相空間に粒子分布を射影した際の粒子の占める面積）が増大してしまうため、通常はカソード上での磁場を打ち消すための Bucking Coil で逆の極性の磁場を生成する。本研究においては、カソード上においてソレノイド場をつくる必要があるため、この Bucking coil の極性を順方向へと再反転して用いる。これによりカソード上で 0.1T 程度の磁場を生成することができ、図 3. に示すように、計算上は数万程度の xy 非対称ビームの生成が可能となる。非線形効果が顕著となった場合、y エミッタンスに大きな増大が生じ、結果としてエミッタンス比が大きく減少することが予想される。その大きな原因がカソード上における大きな非線形空間電荷効果である。空間電荷効果はローレンツ の 2 乗に逆比例するため、加速することにより大幅に低減できる。一方で、ILC には偏極電子ビームが必要であり、NEA(Negative Electron Affinity) GaAs という特殊な表面状態を持った半導体カソードを使用しなくてはならない。NEA-GaAs は表面の脆弱性により低い電場の DC 電子銃でしか使用できないという制限がある。高い加速電場を生成できる RF 電子銃内で使用できるようにするには、NEA-GaAs の高耐久化が必要である。NEA-GaAs の高耐久化については、薄膜半導体によるヘテロ接合を表面に生成し、安定的に電子ビームを生成する手法を提案している。その高耐久化の実証も本研究の目的の一つであ

る。

4 . 研究成果

図4 . は CsKTe 薄膜半導体による GaAs の NEA 活性化の実験結果である。横軸の光電効果に用いる光子のエネルギー (eV) で示し、縦軸に量子効率を示す。本結果においては清浄化した GaAs 表面に Te を 10 蒸着し、Cs および K を 10 づつ蒸着した場合の変化を示している。50 程度 Cs と K を蒸着すると、量子効率が低エネルギー側で上昇しており、1.4eV で鋭く立ち下がっているのが確認できる。このエネルギーは GaAs のバンドギャップエネルギーに相当し、GaAs の価電子帯から励起された電子が偏極電子ビームとして真空中にとりだされていることを示している。この手法により活性化したカソードの寿命 (量子効率が $1/e$ に下落するまでの暴露量) を実験的に測定したところ、 6.49 ± 0.01 ($10^{-3} Pa \cdot sec$) となり、従来手法の 0.29 ± 0.01 ($10^{-3} Pa \cdot sec$) に比べて 20 倍程度の耐久性の向上を確認した。

図5 . にエミッタンス交換のシミュレーション結果をしめす。横軸はカソードからの距離、縦軸はエミッタンスである。この結果は空間電荷効果および磁場の色収差の効果を含めたものである。線形効果のみによるシミュレーションでは $\varepsilon_x = 29, \varepsilon_y = 0.03$ ($mm \cdot mrad$) という 1000 程度のエミッタンス比が得られると期待されたが、図5 . ではエミッタンス比は 160 程度となっている。この ε_y 増大の原因はカソード近傍の空間電荷効果である。シミュレーションでは RF 電子銃を仮定しており、50MV/m 程度の高い加速電場を用いているが、それでもエミッタンス増大は顕著であった。この結果より、 $\varepsilon_y =$

0.02 ($mm \cdot mrad$) 程度の極めて小さいエミッタンスを得るには、空間電荷効果のさらなる低減が必要であり、そのためには初期ビーム径を大きくしなくてはならない。一方で、初期ビーム径を大きくすれば、初期エミッタンスもそれに比例して増大してしまうため、本手法で ILC で必要とされる極低エミッタンスの直接生成は困難であることが結論された [4] 。この困難を克服する手法として、xy エミッタンス交換に加えて、xz エミッタンス交換 (z は長手方向) を実施することで克服する手法が栗木、Piot らにより提案された [4]。この手法では空間電荷制限を大きく緩和するためビーム径を大きくとり、その条件の xy 交換により

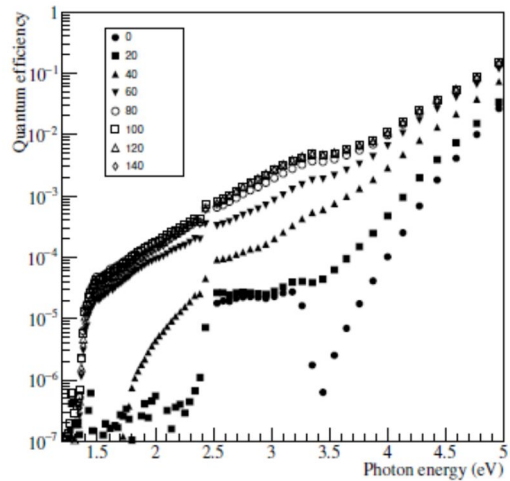


図4. 光子のエネルギー、縦軸に量子効率を

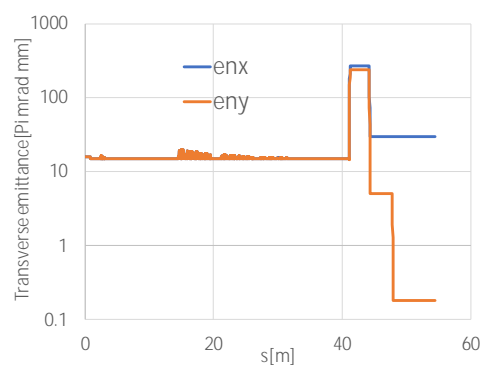


図5. 横軸にカソードからの距離をとり、縦軸にエミッタンスを示したもの。Xy エミッタンス交換により大きな非対称性が得られている。

$\varepsilon_y = 0.02$ (mm.mrad)を実現する。その際、初期エミッタンスが大きいため ε_x は極めて大きな値となるが、 ε_z とさらに交換することで、 $\varepsilon_x = 10$ (mm.mrad)という所定のエミッタンスを得ることができる。結果として ε_z は極めて大きな値となるが、 ε_z に対する制限は極めて緩いため問題とはならない。以上の提案は2020年度からの科研費基盤Bに採択され、引き続き実現に向けた研究を続行している。

[1] ILC Technical Design Report (2013).

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

[3] M. Kuriki, et al., J of Phys. Conf. Seri. 1350, 012047(2019)

[4] M. Kuriki, et al.. *Proc. Of IPAC2019*, MOPMP009(2019)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 M. Kuriki, R. Tamura J. Power, H. Hayano, X. Jin, T. Konomi, Y. Seimiya, N. Yamamoto, P. Piot, M. Washio, K. Sakaue. S. Kashiwagi	4. 巻 1
2. 論文標題 EFFECT OF INITIAL PARAMETERS ON THE SUPER FLAT BEAM GENERATION WITH THE PHASE-SPACE ROTATION FOR LINEAR COLLIDERS	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 proceeding of IPAC 2019	6. 最初と最後の頁 MOPMP009
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Masao Kuriki and Kazunari Masaki	4. 巻 1350
2. 論文標題 Negative Electron affinity GaAs Cathode Activation with CsKTe Thin Film	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics Conference Series	6. 最初と最後の頁 12047
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi:10.1088/1742-6596/1350/1/012047	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 3件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 正木一成、栗木雅夫
2. 発表標題 CsKTe薄膜によるGaAsのNEA活性化研究
3. 学会等名 日本加速器学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栗木雅夫、他
2. 発表標題 位相空間回転によるリニアコライダーのための高ルミノシティ扁平ビームの生成
3. 学会等名 日本加速器学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栗木雅夫、正木一成、郭磊
2. 発表標題 Cs-K-Te薄膜によるGaAsスピン偏極フォトカソードの活性化研究
3. 学会等名 日本物理学会年会、九州大学伊都キャンパス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田村遼平、栗木雅夫、他
2. 発表標題 位相空間回転によるリニアコライダーのための高ルミノシティ扁平ビームの直接生成
3. 学会等名 日本物理学会年会、九州大学伊都キャンパス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 栗木雅夫
2. 発表標題 素粒子標準理論を超える物理を見すえた加速器研究
3. 学会等名 日本物理学会年会、九州大学伊都キャンパス（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Kuriki et al.
2. 発表標題 HIGH ASPECT RATIO BEAM GENERATION WITH THE PHASE-SPACE ROTATION TECHNIQUE FOR LINEAR COLLIDERS
3. 学会等名 Linear Accelerator Conference (LINAC2018), Beijing, China (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 L. Guo, M. Kuriki, H. Iijima, and K. Uchida
2. 発表標題 NEA SURFACE ACTIVATION OF GaAs PHOTOCATHODE WITH CO2
3. 学会等名 International Particle Accelerator Conference(IPAC2018), Vancouver, Canada (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栗木雅夫
2. 発表標題 Super Flat Beam Generation with Emittance Exchange Techniques for Linear Colliders
3. 学会等名 ビーム物理研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masao KURIKI
2. 発表標題 Emittance Exchange Program at KEK-STF
3. 学会等名 AFAD 2018, Daejong, Korea (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栗木雅夫、柏木茂、早野仁司、清宮裕史、山本尚人、坂上和之、鷺尾正一
2. 発表標題 エミッタンス交換によるリニアコライダーのための高アスペクト比電子ビームの直接生成
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masao KURIKI
2. 発表標題 Phase-space rotation technique and applications
3. 学会等名 International School on Electron Accelerator, Free Electron Laser and Application of Electron Beam and THz radiation 6-9, March, 2018, IUAC, Delhi, India (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栗木雅夫
2. 発表標題 エミッタンス交換による ビームパンチ形状の最適化
3. 学会等名 ビーム物理研究会 2017/11/16-18 岡崎コンファレンスセンター
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	金 秀光 (Jin Xianguan) (20594055)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教 (82118)	
研究分担者	山本 尚人 (Yamamoto Naoto) (60377918)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教 (82118)	
研究分担者	柏木 茂 (Kashiwagi Shigeru) (60329133)	東北大学・電子光理学研究センター・准教授 (11301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	清宮 裕史 (Seimiya Yuji) (20756720)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器 研究施設・特別助教 (82118)	
研究分担者	坂上 和之 (Sakaue Kazuyuki) (80546333)	東京大学・大学院工学系研究科・主幹研究員 (32689)	