

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01934

研究課題名（和文）高耐久GaAsカソードと六次元位相空間回転による超扁平スピン偏極電子ビーム生成

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・先進理工系科学研究科（先）・教授

研究者番号：80321537

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,000,000円

研究成果の概要（和文）：位相空間回転による6次元位相空間の最適化によるリニアコライダーで必要となる高アスペクト比、超低エミッタンスビーム生成について、理論的および実験的な研究を行なった。シミュレーションにより、国際リニアコライダー計画において必要となる衝突ビームの直接生成について、可能であるとの見通しを得た。KEKのSTF加速器による実証実験を行なったが、100程度のxyエミッタンス比が可能であるとの見通しに対して、実験的には非対称エミッタンスの確認はできなかった。ビームプロファイルが大きく歪んでいるのが原因であると確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

RFBTおよびTLEXという二つのビームの位相空間制御技術について、応用例としてリニアコライダーで必要となるビームの直接生成について検討し、それが可能であるとの見通しを得た。一方で、実験的には生成ビームのプロファイルが大きく歪んでおり、非線形空間電荷効果によりエミッタンスが大幅に増大し、大きなエミッタンス比の確認には至らなかった。しかしビームの位相空間の制御が可能であるとの原理的な実証には実証には充分である。ビームの位相空間の用途による最適化は、多くの既存加速器の実質的な性能向上につながり、それが原理的に実証された意義は小さくない。

研究成果の概要（英文）：We theoretically and experimentally studied the generation of high-aspect-ratio, ultra-low-emittance beams required for a linear collider by optimizing the six-dimensional phase space through phase space rotation. Simulations showed that the direct generation of colliding beams required for the international linear collider project is feasible, and a demonstration experiment was performed using the STF accelerator at KEK, but the asymmetric emittance ratio of about 100 was not confirmed experimentally. We confirmed that this was due to a large distortion of the beam profile.

研究分野：加速器物理

キーワード：リニアコライダー 位相空間制御 エミッタンス

1. 研究開始当初の背景

リニアコライダーとは、電子および陽電子を線形加速器で衝突させ、対消滅反応を通じ様々な新粒子の生成やその反応の詳細な理解を目的とした加速器である。線形加速器を用いることで、軌道をまげることにより発生するシンクロトロンによるエネルギー損失を回避し、より高いエネルギーを実現する 21 世紀型のコライダーである。リニアコライダーでは、限られた長さの線形加速器により所定のエネルギーを得る必要から、高勾配加速空洞が必要である。また、加速されたビームは衝突点を通過するのは一度きりであるから、ビームあたりの衝突確率を高める必要がある。そのためには衝突のルミノシティ(反応断面積で規格化したイベント生成率)を高めることが必要である。ルミノシティは大雑把には、衝突点でのビーム電流密度に比例するが、加速に必要な電力がビーム電流に比例することから、効率的な運転のためには、ビーム電流は抑制し、一方で衝突点でのビームサイズを極限まで絞り込む。さらにこの際に二つの横方向座標を非

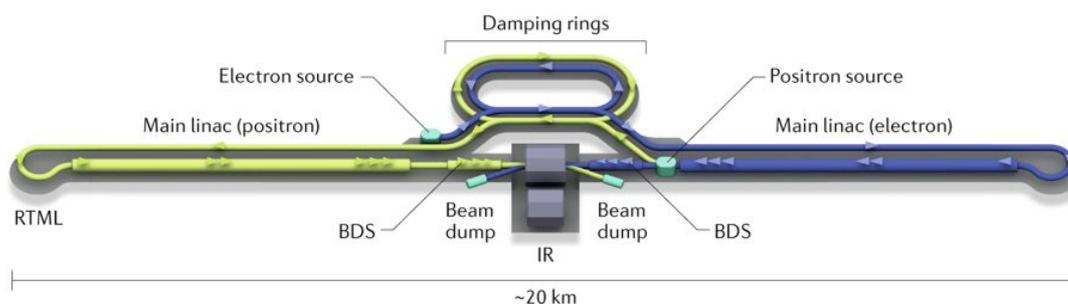


図 1. リニアコライダーの概念図 (Nature Reviews Physics 1 : 2 doi: 10.1038/s42254-019-0044-4(2019))

対称に絞り込むことで、ビーム相互作用として生じるビーム輻射によるエネルギー幅の増大という問題を回避する。このため、リニアコライダーの衝突ビームは、非対称かつ極小のビームの実現が必要である。現在の標準設計においては、加速前にビームを中央に設置された 3.1km のリング (Damping Ring, DR) に 0.2 秒ほど蓄積し、放射減衰により非対称エミッタンスのビームを生成し、それを加速後に衝突点前で絞り込むことで所定のビームを実現する。図 1 に示すように電子および陽電子の DR は共通のトンネルを使用するため、中央部に配置され、そこで得られた非対称極小エミッタンスビームは 10km におよぶ長いビーム輸送ラインを経て、主加速器に送り込まれる。

2. 研究の目的

本提案は、国際リニアコライダー ILC をはじめとした電子・陽電子リニアコライダーに必要な、高スピン偏極、超扁平、極低エミッタンス電子ビームを、コンパクトな入射部だけで直接生成する試みである。(x, y, z) と全ての自由度間のエミッタンス交換により、大ビーム径で生成した高スピン偏極ビームから、終状態における超扁平、極低エミッタンスを実現する新しい提案である。これにより、3.1km の大型ダンピングリングと、10~25km にわたる長大なビーム輸送ラインが不要となり、リニアコライダーの大幅なコストダウンが実現される。またこの技術により、ビームの位相空間における操作性を劇的に増大させ、リニアコライダーのみならず、自由電子レーザーやコヒーレント放射源など、加速器科学全体に大きなインパクトを及ぼす。

図 2. に本提案の概念図を示す。電子銃から発生したビームはまず RFBT(Round to Flat Beam Transportation)と呼ばれるビームラインを通過する。電子銃から入射加速器を経て、skew Quadrupole(通常の Quadrupole 磁石を 45 度回転させたもの)までが RFBT ビームラインであ

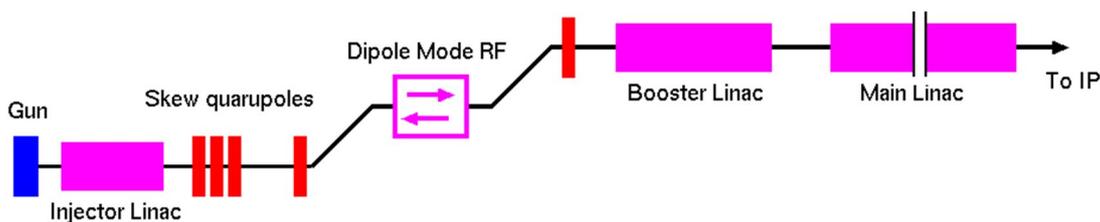


図 2. 本研究が提案する入射部ビームライン。

る。ここでは、所定のソレノイド磁場で電子ビームを生成し、発生する角運動量(x-py あるいは y-px 相関)を SkewQ 磁石で解消するさいに位相空間分布に必然的に偏りが生じる性質を利用する。エミッタンスの積は不変量であるから、y 方向のエミッタンス ϵ_y を極小化しようとするれば、 ϵ_x は初期エミッタンスに比べて大きくせざるを得ない。現実的な熱エミッタンスが $\epsilon = \sigma \times 10^{-3}(\text{m})$ 程度だとすれば、ビーム径 σ を 10mm 程度として、エミッタンスは 10 μm 程度となる。リニアコライダーで要求される 0.04 μm という極小エミッタンスを作ると、 ϵ_x は 1000 μm と極端に大きくなり成立しない。この過大となる x 方向のエミッタンスを z 方向に押し付けてしまおうというのが我々のアイデアである。z 方向のエミッタンスに対する要求は $\epsilon_z=8.4\text{e}+5\mu\text{m}$ と極めて緩いのでそれが可能である。エミッタンスの見積を表 1 に示す。そのためのビームラインがシケインと Dipole 空洞で構成される TLEX(Transverse to Longitudinal Emittance eXchange)ビームラインで、このビームラインの通過により ϵ_x と ϵ_z が交換される。本提案の目的は、これらの手法に基づくリニアコライダーで必要となるビームの DR を使用しない生成について、実験的および理論的に実証することである。

Position	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_z
Cathode	45	45	10
RFTB	5.1e+4	0.04	10
TLEX	10	0.04	5.1e+4
ILC design	10	0.04	8.4e+5

表 1. エミッタンスの見積

3. 研究の方法

本研究は、シミュレーション研究、実際の加速器を使用したビーム実験を二つの柱としておこなった。図 3 に KEK に設置されている STF 加速器の概要図を示す。この加速器は L-band の RF 電

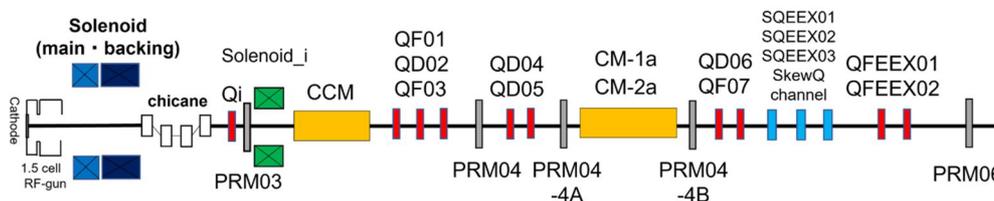


図 3. STF beam line の模式図

子銃から CsTe カソードにより電子ビームを生成し、下流の二つの超伝導加速モジュール(CCM および CM)によりエネルギーにして 350MeV 程度まで加速する。RFBT 実験で必要となる各運動量をもったビームは、RF 電子銃に設置している Bucking solenoid の極性を反転させることにより得られる。CM 下流には水色で示されている三台の skewQ 磁石が設置されており、STF では本提案の前半部分である RFBT 実験が実施可能である。

4. 研究成果

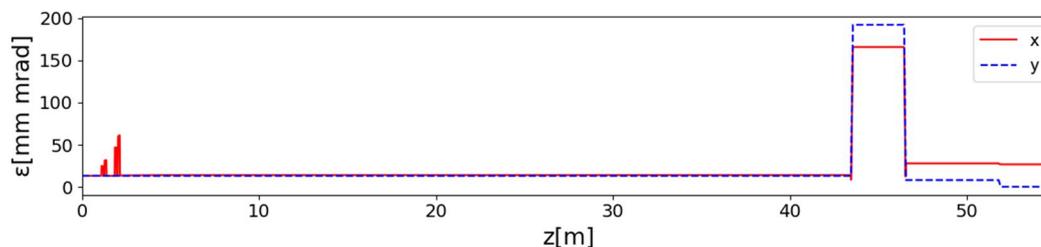


図 4. STF における RFBT 実験のシミュレーション結果。縦軸はエミッタンス、横軸はカソードからの距離。

図 4. に STF 加速器における RFBT 実験のシミュレーション結果を示す。最終的に得られるエミッタンスは ϵ_x と ϵ_y は 26.6 μm と 0.13 μm となり、およそ 200 程度のエミッタンス比が得られる予定であった。しかし実際には中流部である QF03 と QD05 の間で 30 μm 程度のエミッタンス増大が生じ、実験は成功しなかった。その後の調査により、エミッタンス増大は実際には入射部 CCM より上流)で生じており、発生時の電子ビームプロファイルが大きく歪むことにより非線形空間電荷が強められて、エミッタンス悪化が生じたのであろうことが示唆された。

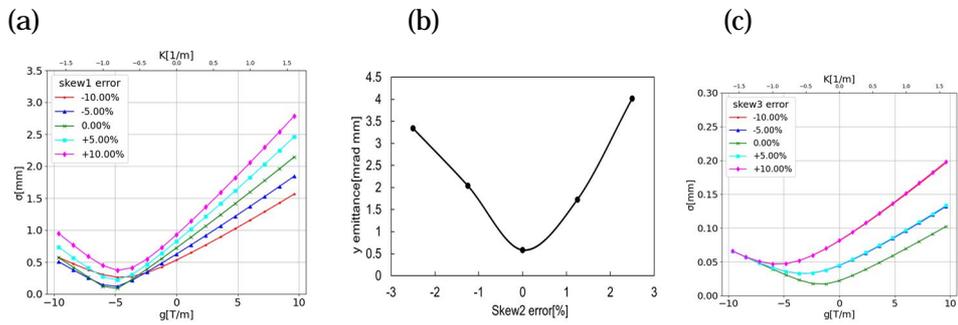


図 5. (a) sk2 と sk3 がエラーを持っている場合の Q スキャン曲線。(b) エミッタンスと sk2 のエラーの関係(c) sk1 と sk2 がエラーを持つ場合の Q スキャン。

RFBT の鍵を握る三つの skewQs(sk1, sk2, sk3) について、チューニングシナリオを図 5. に示す。Sk1, sk2, sk3 は上流から並んでいる。図(a)は sk2 および sk3 が所定の電流よりも-10%低い状態での、sk1 の異なる電流の場合の Q-scan を表したもので、sk1 が所定の電流(0%誤差)の場合のウエストサイズが最初となることをしめしている。すなわち、このことからウエストサイズをみることで、sk1 は最適化が可能であることをしめしている。図 5(b)は横軸に sk1 と sk3 は誤差のある条件での sk2 の所定の電流からの相対誤差とエミッタンスを示したもので、エミッタンスを最小化する条件が sk2 の最適値を与えることがわかる。図 5(c)は sk1 と sk2 が誤差が

無い状態での sk3 の異なる電流による Q-scan の結果をしめしたもので、この場合は最適値がビームサイズの最小値を与える。Sk1 と sk2 が誤差を持つ場合は、sk3 の電流による差は見られないことから、sk1 と sk2 が十分に最適化されていないと、sk3 の最適化は不可能であることをしめしている。すなわち、これらより sk1 をビームサイズが最小となる状態に合わせ、さらにエミッタンスを最小となる状態に sk2 を合わせ、さらにビームサイズが最小の状態に sk3 をあわせることで、最適状態に至ることが出来る。

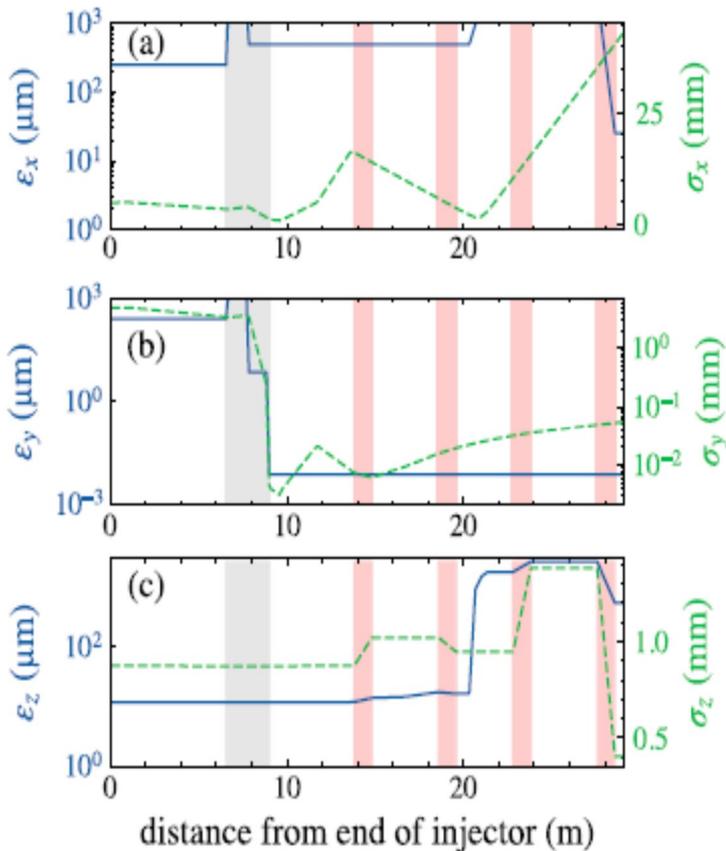


図 6. RFBT + TLEX ビームラインによるエミッタンス(a)x, (b)y,そして(c)z。

したものである。本研究より、 $(\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z) = (25, 5, 7.3e-3, 550) \mu\text{m}$ というビーム生成が可能であることが明らかとなった。x エミッタンスは ILC の設計値よりも若干大きいものの、y エミッタンスは一桁程度小さく、ルミノシティの増大も見込める値となっている。また、このビームを仮定し、既存のバンチ圧縮セクションを通した場合に得られるバンチ長は $23 \mu\text{m}$ となり、既存設計の値である $300 \mu\text{m}$ よりも一桁程度バンチ長を圧縮できる可能性がある。同等の陽電子ビームの生成という未解決課題があるが、これが実現したとすると現状の ILC の設計に比べて、5 倍程度のルミノシティ向上が見込める。またこの論文ではソレノイド磁場をカソードに適用することによるスピン減偏極についても検討しており、この効果は極めて小さいことが確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 M. KURIKI, S. Konno, H. Nagoshi, T. Takahashi, T. Omori, J. Urakawa, K. Yokoya	4. 巻 -
2. 論文標題 BEAM LOADING COMPENSATION OF APS CAVITY WITH OFF-CREST ACCELERATION IN ILC E-DRIVEN POSITRON SOURCE	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. of IPAC 2021, Campinas, SP, Brazil	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18429/JACoW-IPAC2021-TUPAB015	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 H.Nagoshi, M.Kuribayashi, M.Kuriki, P.V.Martyshkin, T.Omori, T.Takahashi, M.Yamakata, K.Yokoya	4. 巻 953
2. 論文標題 A design of an electron driven positron source for the international linear collider	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instrumentation and method physics research A	6. 最初と最後の頁 163134
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2019.163134	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 該当する

1. 著者名 T. Xu , M. Kuriki ,P. Piot and J. G. Power	4. 巻 26
2. 論文標題 Damping-ring-free electron injector proposal for future linear colliders	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW ACCELERATORS AND BEAMS	6. 最初と最後の頁 14001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevAccelBeams.26.014001	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 該当する

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 M. Kuriki, K. Masaki, S. Obora, Z. Liptak, N. Kosugi, L. Guo, M. Takashima
2. 発表標題 High robustness NEA activation of GaAs cathode for polarized electron beam generation from RF gun
3. 学会等名 AFAD2021（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. KURIKI, S. Konno, H. Nagoshi, T. Takahashi, T. Omori, J. Urakawa, K. Yokoya
2. 発表標題 BEAM LOADING COMPENSATION OF APS CAVITY WITH OFF-CREST ACCELERATION IN ILC E-DRIVEN POSITRON SOURCE
3. 学会等名 IPAC2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 栗木雅夫, 金野舜, 名越久泰, Zachary LIPTAK, 高橋徹, 清宮裕史, 福田将史, 横谷馨, 浦川順治, 大森恒彦
2. 発表標題 ILC電子ドライブ陽電子源キャプチャーライナックにおけるビームローディングの補償
3. 学会等名 日本物理学会年会、2022年3月
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金野舜、栗木雅夫
2. 発表標題 ILC陽電子源におけるキャプチャーライナックでのビームローディング補償
3. 学会等名 ビーム物理研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荒本真也、栗木雅夫
2. 発表標題 KEK STF におけるRFBT実験
3. 学会等名 ビーム物理研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 栗木雅夫、柏木茂、山本尚人、金秀光、清宮裕史、山本康央、早野仁司、坂上和之、鷲尾方一
2. 発表標題 6次元エミッタンス交換による超扁平リニアコライダー衝突ビームの直接生成
3. 学会等名 日本物理学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 栗木雅夫
2. 発表標題 定在波加速空洞における非クレスト加速条件での過渡的ビームローディングの補償
3. 学会等名 ビーム物理研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 栗木雅夫、金野舜、高橋徹、ザカリーリブタック、大森恒彦、横谷馨、浦川順治、福田将史
2. 発表標題 ILC 電子ビームドライブ陽電子源におけるoff-crest 加速条件でのビームローディング補償
3. 学会等名 日本物理学会年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

広島大学加速器物理研究室 https://accel.hiroshima-u.ac.jp/

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	早野 仁司 (Hayano Hitoshi) (00173055)	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・研究員 (82118)	
研究分担者	山本 康史 (Yamamoto Yasuchika) (20415045)	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・准教授 (82118)	
研究分担者	リプタック ザカリージョン (Liptak Zachary John) (80880046)	広島大学・先進理工系科学研究科(先)・助教 (15401)	
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	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	坂上 和之 (Sakaue Kazuyuki) (80546333)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・主幹研究員 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------