23aZL-7 超低エミッタンス・フォトカソード電子銃の開発と展望

(財) 高輝度光科学研究センター 加速器部門 冨澤 宏光

"Advanced laser technology and innovative ultra-high-brightness gun with laser-induced Z-field emission" JASRI/SPring-8 Hiromitsu Tomizawa

各種加速器将来計画に必要とされる超低エミッタンス電子銃の候補にフォト カソード RF 電子銃がある (SPring-8 では 1996 年に独自開発した RF 電子銃空 胴(単空胴)で研究開始、日本の他の研究所は㈱住友重工が BNL から最初に導 入した 1.6 セル空胴を用いている)。この電子銃は、レーザパルスを RF 空胴内 のカソード面に照射し生成された光電子を, RF 空胴内の高電界で電子ビームが 空間電荷効果で拡散しないうちに一気に加速し、低エミッタンス電子ビームを 生成する。レーザパルスの品質がカソード直後の電子ビーム品質を左右するた め、エミッタンスはレーザ技術に依存するところが特に大きい。特に、カソー ド発生直後の電子ビームの3次元分布形状により、エミッタンス増大の程度が 大きく異なるため、カソードに照射されるレーザパルス形状の精密整形と制御 は必要不可欠である。特に理想的には、無限長の円筒型パルス形状を実現する と動径方向に非線形な空間電荷効果によるエミッタンスの増大が無い。そのた め SPring-8 加速器部門ではレーザシステムの長期安定化を推し進め、極低エミ ッタンス電子ビーム生成のためレーザパルス形状の最適化を 2000 年より世界 に先駆けて提案し、先進的な整形技術開発をしてきた。レーザ源安定化におい ては、恒温恒湿クリーンルーム(環境試験室)の設置、機械構造強化光学ホル ダーの開発,各機器別の温調による物温コントロール等の対策を施した。結果 として、最終段の紫外レーザ(THG)の出力安定度を、フラッシュランプ寿命期間 (1.5ヶ月) 1.4% (rms) に保持できるようになった。また、オシレータは 10ヶ 月の連続安定運転を出力安定度 0.3% (p-p)) で達成し, 2006 年度までに実用運 転の見通しがたった(2005 年には、この方式が SLAC の LCLS のフォトカソード 用光源レーザに採用されている)。

レーザパルスの3次元形状制御では、横方向プロファイルを遺伝的アルゴリズムの援用による可変形補償ミラーで、ほぼ均一な円筒強度分布に整形した。 縦方向プロファイルは、チャープパルス・スタッカー(下図は量産普及型として、2007年に開発した複屈折結晶ロッド型)による方法で、矩形状に整形した。 結果として、均一な円筒形状レーザビームを実現して当初の目標を達成した。 この整形されたレーザパルスで生成した電子ビームの規格化水平エミッタンス は、1.4 π mm mrad (0.38 nC)、2.0 π mm mrad (1.0 nC)であった。

※入射パルス幅は全結晶ロッドの分散で伸長後に2.5 psになるように調整する。 また、互いに45度回転した各前段ロッドの結晶軸で規定される、互いに直交する 偏光チャープパルスをそれぞれ図中に記号SとPで表す。

SPring-8加速器部門では、上に述べたような円筒型3次元パルス形状だけで なく、極低エミッタンスビーム実現のために有効であると世界で繰り返し提唱 されているラグビーボール型(エリプソイド形状:KV-distribution)のための 方法も何種類か提案、および実施している。これは円筒型パルス整形による非 線形な空間電荷効果の抑制は、円筒型パルスがビーム進行方向に無限に長く、 端の効果が無視される時に実現されるのであって、現実にカソード直後に生成 されるバンチの縦横のアスペクト比は1:1に近く、この前提はここで崩れて しまっている。㈱浜松ホトニクスとの共同開発中の透過型ダイヤモンドと Ce:Te カソードを想定したファイバーバンドル・レーザ3次元パルス形状整形システ ムで、2004年に世界で初めて3次元的に均一なエリプソイド型パルスを実現し ている。電子ビームバンチをエリプソイド形状にすると、電子ビームバンチが その存在する空間に非対称な境界条件が無く、等速直線運動している場合にの み、有限のバンチ長であっても非線形な空間電荷効果がない条件を作りだせる ものである。しかしながら、実際のカソード近傍では、カソードという境界条 件がビーム進行方向に非対称に存在し、しかも急速に加速されるために、この エリプソイド形状に電子ビームバンチを整形する案も RF 電子銃で極低エミッ

タンスを実現するには最適の案とは言いがたい。

これを解決する案としてLuitenスキームというものが提唱されている。これ はフェムト秒の超短パルスから出発し、空間電荷効果によるビーム広がりを逆 手にとって自然にエリプソイド形状を加速にしたがい理想形状に成長していく 条件を見出そうとするものである。シミュレーション結果では、100pC 以下の バンチ電荷の時にこのような解が存在するという報告がある(下図参照のこと)。 しかし、実際のカソードを無視すればこのような理屈は成り立つかもしれない が、フェムト秒の応答性をカソードに要求する時点で金属カソードに限定され てしまう。そうすると量子効率が悪いために高強度レーザパルスを超短パルス に圧縮して照射することになり、カソードを破損してしまう。したがって、残 念ながら現状では机上の空論である。

Water bag: Luiten スキーム(エリプソイドの発展系?)



少し話は飛ぶが、私は以前からフォトカソードが利用する光電効果に果たし てレーザは必要なのか?と問うてきた。ランプのような照明光のほうが均一な 光源であるし、ワーキング・ディスタンスが稼げないなら単に背面照射可能な カソードを開発すれば良いだけである。このような考え方から先述のファイバ ーバンドル整形の発明に至った訳であるが、逆にレーザ光源の能力を 100%有効 利用しているのか?という疑問も同時に生まれた。レーザがコヒーレント光源 であることを逆に利用できないかと考え、超短パルスにした時の高強度電場の 有効利用しようと考えた。そこでショットキー効果で実効的に仕事関数を下げ るために、カソード面に垂直な Z 方向に高電界発生させる方法を考案した。ラ ジアル偏光をカソード面に集光させることで、コンパクトなフェムト秒レー ザ・オシレータでも~ 1 GV/m の高強度電場を発生させることが可能で、仕事関 数を~2 eV 程度下げられることをシミュレーションで確認している(カソード 面の電子がレーザ電場に応答すると仮定)。果たしてそのようなことができるか は私もまだ半信半疑ではあるが、実際にカソード面内での電子応答がフェムト 秒程度の金属カソードを用いて、電子銃の電界で引き出すことで、高繰り返し 運転可能な電子生成方法(利用するショットキー効果と光電効果については下 図に示す)の可能性が開ける。



このシミュレーション結果に基づいた Z 偏光・円環レーザ照射光学系は 2007 年に開発し、現在その実証試験(ラジアル偏光およびアジマス偏光の集光によ る量子効率の比較実験:多光子吸収と区別してショットキー効果だけを確認す るため)の準備を行っているところである。この Z 偏光電子銃は、電子銃の分 類としては通常の光電効果を利用するフォトカソードと区別し、平面レーザ電 界放出型電子銃というべきものである。まだ準備段階ではあるが、光電効果と レーザ電界放出を組み合わせたような下図のような試験も 2008 年に予定して いる。結果は"神のみぞ知る"であるが、もし実現できれば Luiten スキームを 唯一実現できる方法となるはずである。



(焦点距離の4乗に反比例)

超低エミッタンス・フォトカソード電子銃の開発と展望

レーザパルス形状(3次元)の整形技術開発を中心として 富沢宏光(JASRI 加速器部門) 1 SPring-8におけるRF電子銃開発の歴史と背景 2 円筒型パルス形状レーザ源開発 ・レーザパルス形状の最適化 トランスバース(空間)および時間プロファイル ・パルス計測技術と最適化フィードバック 3 X,Yエミッタンスの非対称性の原因追求 ・第3の入射方法:ホローミラー入射系の提案 4 Z偏光レーザ源開発と平面レーザ電界放出型電子銃 ・2偏光について 実際の光学系とその発生原理

熱電子銃と光電子銃の比較

 熱カソード電子銃
…電子のパルス幅(~1ns)が長いので、 加速管で加速するには、パンチャーが必要。
電子の生成方法 や カソードを高温に熱することでその伝 導体の自由電子が表面障壁を越えて真空中に染み出る <u>熱電子放出</u>を利用。
カソードの温度 ~ 1000℃
フオトカソード電子銃
…電子のパルス幅(~10ps)で短くできるので、 そのまま加速管で加速できる。高品質レーザ光源
電子の生成方法 や レーザ光をカソード面に照射することで 電子が真空障壁を飛び越えて出てくる<u>光電子放出</u>を利用。
レーザ波長 (h ν) - カソード仕事関数: 0.1eV ~1000℃

なぜ電子銃にレーザ光を使うのか?

現SPring-8 入射器Linacの入射部



フォトカソードRF電子銃

従来の入射器としてのライナックには、<mark>蓄積リングの飽和エミッタンス</mark>で決まってしまうので、その電子ビーム源に低エミッタンスは求められなかった。

X線FELなどの次世代放射光源がLinac-baseのため、低エ ミッタンス電子銃開発の必要性が生じる。

低エミッタンスビームの要請 ⇔ 新型電子銃の開発



SPring-8 RF電子銃の特徴



現SPring-8 Linacの熱電子銃を光電子銃で置き換えると・・・・

加速器側はコンパクトになりシンプルになるが、レーザインフラが 必要になる(バンチャー機能はレーザ光源が担う)。



SCSS試験加速器の低エミッタンス熱電子銃入射部 Courtesy of XFEL/SPring-8 Beam Dynamics Team



SCSS熱カソード入射部 vs. SP8RF電子銃

SCSS熱カソード入射部 ・・・ 電子ビームを薄く長く生成し、加速しながら丁寧に 圧縮していく。バンチャー(Factor:~500)必要。

・電子ビームの生成方法としては自然な方法なので安定供給が望める。 ・バンチングや高品質部の切り出し等の複雑な機構が必要。

▶ 田中均氏を中心とするRIKEN/JASRI合同チームで運転調整で追い込む

・運転パラメータが既存のシミュレーションコードによる計算に乗りやすい ため、パラメトリックに調整が可能である。

SP8フォトカソード電子銃 ・・・精密3次元整形された超短パルスレーザを カソードに照射し、短パルス電子ビーム生成後、 一気に光速にもっていく。レーザの安定化が必須。

- ・電子ビーム生成直後のエミッタンス増大を抑制するバンチ形状が実現できれば、その後一気に加速してて低エミッタンスビームが実現できる。
- ・レーザの安定化とのレーザパルス整形システムなどの複雑な機構が必要。

■■■■ JASRI加速器部門で3Dパルス整形システムを世界で初めて実現

・特にカソード近傍において、実験とよく合うシミュレーションが出来ていない。 ・レーザ光源と電子銃本体が分離独立しているため、レーザ技術の更新容易。



・レーザは加速器分野では新技術であるが、その性質を踏まえ戦力として 取り入れていかなければならない技術 ··· Seeding, EOS, Pump& Probe



SPring-8 RF電子銃の歴史

- 1996 Study of photocathode RF guns started.
- 1999 First beam test with YLF laser system
- 2001 New Ti:Sapphire laser system installed. All concepts of 3D-Laser shaping technologies were proposed.
- 2002 Emittance 2.3 πmm mrad @0.1 nC (pulse width: 5 ps) with homogenizing in Spatial profile (using Microlens array) Cartridge type cathode development started.
- 2003 New gun & laser test room constructed and an accelerating structure installed.
- 2004 Maximum field of 190 MV/m at cathode Laser was stabilized with 0.2%(rms @0.3TW fundamental) for 1.5 Month (Laser Oscillator itself: 0.3% p-p for 4.5 months)

2005 3D-laser shaping system was completed (10 months continuous).

2006 Emittance 1.4 πmm mrad @0.4 nC (pulse width: 10 ps) with 3D-Cillindlical laser pulse (Flattop SP (DM); Square TP (PS))

2007 Axicon lens pair-hollow beam incidence system with 3Dlaser shaping was developed. Z-pol. gun was proposed.

SPring-8 RF電子銃用レーザ源の構成



レーザ源の安定化 2001~2005年



0))

重要性

・信頼性のある実験データを得るために ・営業運転を行なう加速器用として

不安定要因と対策

- ・オシレータの光共振器長(光路長)の変化
- ・レーザ用励起光源のレーザ結晶照射位置の変化
- ・増幅器種光の入射軸変化
 - ➡ 環境安定化および機械的安定性(耐温度・耐振動)の向上 オシレータのフィードバック制御





ミラー等光学素子特性の経年変化
➡ 結晶等の埃の焼き付きを防ぐため、加湿による帯電防止



環境試験室を兼ねる恒温恒湿クリーンルーム





ビームエミッタンス増加の要因

熱エミッタンス

レーザスポット径と電子発生初期の運動量広がりの積で決まるエ ミッタンスの初期値

加速電界拡がりによるエミッタンス

電子銃空胴内の電場拡がりや非対称性によるエミッタンス増大

RFエミッタンス

電子バンチ内の電子は、バンチ内の進行方向位置により異なった RF電磁場で加速され、エミッタンスの増大が起こる

空間電荷効果によるエミッタンス

プロファイルの歪みが非線形空間電荷効果を通じ、ソレノイド磁場 で補正不可能なエミッタンス増大につながる



3次元的レーザパルス整形システム



Cylindrical

Cylindrical

円筒型レーザパルス整形システム







パッシブな素子を用いる方法(2002年頃) マイクロレンズ・アレイ

レーザ光を拡散させて簡単に疑似的に均一な分 布を作れるが、自由に制御できない、投映距離が 短いなどが欠点



マイクロレンズアレイの一例

■アクティブな素子を用いる方法(2005年以降)

可変形補償ミラー (Deformable Mirror) 薄膜鏡の形状を電気的に制御し、波面整形等を行なう光学素子

SPring-8で採用したDM ミラーのセル数:59個

制御電圧ステップ:256



DMと各セルに与えた信号レベルの一例





DMによる整形結果

技術的問題と解決

鏡面形状の組み合わせが256⁵⁹通りもあるため、巧みなソフトウェア制御を 用いないと、最適解を得るのに膨大な時間を要する



不均一なプロファイルを持つ紫外レーザがDMによって整形された例

マルチバンチーCW対応可能な時間プロファイルの整形











UVレーザパルス(THG)の3次元形状







パルススタッカーでのマクロ&ミクロパルス調整法



チャープパルス・スタッカー法 – 結果

パルススタッカーの調整

マイクロパルスが、カソード面で2.5psのパルス幅になるよう、DAZZLER
で最適なチャープ量(2次分散)を与えた(DAZZLERは微調設定可能!)

Cylindrica

・パルススタッカーの調整は、直接電子ビームを観測して行った

レーザ入射位相をビームエネルギー分散が大きくなる位相に \square 調整し、エネルギー分布から時間プロファイルを観る

結果

ほぼ理想的な矩形状の時間プロファイルを得ることに成功

パルススタッカー調整中の電子ビームエネルギースペクトル



左:分離しているマイクロパルス 右:マイクロパルスが重なって一つのパルスになる



Cylindrica

Cylindrica

パルス・スタッキングロッド方式

20 mm



5 mm

10 mm





フェムト秒ストリークカメラの計測限界

1. ストリークカメラの正しい計測:入射光量は絞ってMCPゲイン最大

(ダイナミック・レンジの問題で矩形パルスの立ち上がりと幅の同時計測は困難)

・ストリークカメラの各レンジの時間分解能はそのレンジの1/100

500psレンジ -> 5ps @800nm 100psレンジ -> 1ps @800nm 50psレンジ -> 500fs @800nm

200psレンジ ー> 2ps <mark>@800nm</mark> <u>FESCA200の場合</u>

20psレンジ -> 300fs以下(200~300fsの間でもFWHMはばらつく)@800nm

・設定可能な最小入射スリット幅10µmでの時間分解能は?
フォーカスモードで測定されるスリット像の幅(9ch)が、スリットによる時間分解能の制限(20psレンジのとき、20ps×9ch/1024ch = 176fs)

2. フォトカソードの熱エミッタンス増大と同じ問題

入射光が短波長になると光電子の初速度分布が大きくなり、時間分解能が劣化

3. 100fsのレーザパルスはストリークカメラFESCA200で

800nm: 時間分解能 ~300 fs (FWHM) [カタログ保証値] 500nm: 時間分解能 ~500 fs (FWHM) [参考値] 266nm: 時間分解能 ~600 fs (FWHM) [参考値] 量子ゆらぎ領域で、200fs以下のパルス幅を議論すべき段階にない。





円筒型パルス形状の最終形態 Cylindrical 出願番号:特願2007-197232 **Oscillator** 発明者: 冨澤宏光(JASRI) Dazzler Feedback! **Pulse stacker** Amplifier THG Stretcher presso **AOPDF SPIDER** THGパルス形状 精密計測 **UV-pulse stacking rods** α -BBO SPSPSPSP 45° 20 ps 2.5 ps $20 \text{ mm} \pm 0.1 \text{mm}$ $10 \text{ mm} \pm 0.1 \text{mm}$ $5 \text{ mm} \pm 0.1 \text{mm}$ Angle of (10 ps \pm 50 fs) $(5 \text{ ps } \pm 50 \text{ fs})$ $(2.5 \text{ ps } \pm 50 \text{ fs})$ 17.6° 70.37° 35.19° rotation

Cylindrica

円筒型パルス整形のまとめ

Cylindrical

超低エミッタンスビーム生成を目指してレーザ源の改良を行ってきた。

レーザパルス3次元形状の最適化

非線形空間電荷効果の少ない、ほぼ均一で対称な円筒形状ビームを 世界で始めて実現した(2005年度)。

トランスバースプロファイル整形:可変形補償ミラー

時間プロファイル整形:パルススタッカー + DAZZLER

X エミッタンスは、2.0 π mm mrad@1nCを達成。

しかし、Y エミッタンスは1.5倍ほど大きい。原因は直入射ミラーにあると 実証され、ホローミラー入射光学系を導入。

レーザ源の長期安定化

環境安定化および機械的安定性(耐温度・耐振動)の向上、オシレータ のフィードバック制御により、10ヶ月以上の連続運転達成。 これにより、テラワット級レーザ源を加速器用として実用運転する見通し が立った。

レーザー直入射ミラーの影響

カソード面より560mm下流にある レーザー直入射用ミラー ↓ ビーム軸との最短距離 ~ 6 mm

ビームを削る Wakefield



<u>ホロー入射ミラー・チェンバー</u>



MAFIAによりシミュレーションを行ってみると

シミュレーション形状

直径40mm,長さ100mmのパイプ ビーム軸に垂直な金属板 ビーム軸より6mm

実験とほぼ同じビーム条件 (ビーム形状はトラッキング・シミュレーションより)

電荷量	0.83 nC
エネルギー	3.6 MeV
縦プロファイル	4.5 ps (1σ), ±3σ
横プロファイル	3.5 mm (1σ), ±3σ



ホロー入射ミラー

現状の直入射ミラーによるX,Yエミッタンス非対称性



水平方向に直入射ミラーを入れた場合のエミッタンス



第3のレーザ入射方法の円環ビーム入射へ



ホロー入射ミラーを入れた場合のエミッタンス

(ホロー入射ミラー近傍の振る舞い)



金属ミラーではなく誘電多層膜ミラーにすると影響がほぼ無いことを確認



分割位相板によるラジアル偏光生成



Z偏光レーザ高電界を利用した超コンパクト・マルチバンチ・ フォトカソード電子銃の可能性

> 出願番号: 特願2007-133183 発明の名称: 電子銃、電子発生方法、および偏光制御素子 発明者: 冨澤 宏光(JASRI)、小林 実(㈱ナノフォトン)

さらなるフォトカソードレーザ光源の発展のめに。。。

<u>~干渉光源であるレーザ使用の功罪を問う~</u>

レーザのような干渉性光源は光電効果に必要ない(ランプでもOK)。 短パルス電子ビーム生成とワーキング・ディスタンスを長くとる要請 から超短パルスレーザ光源を用いている。

今一度、コヒーレント光源使用の功罪を再考をすべきである。

1 レーザ光のカソード面での干渉パターンは熱エミッタンスを 悪化しないか?スペクトル(位相、強度)を通じて縦方向のモジュ レーションとして影響しないだろうか?

スペックルキラーの必要性 → *ファイバーバンドル整形法* (特開2007-249059)

2 レーザ光がコヒーレント光源であることを逆に積極的に利用で きないか?今のフォトカソード光源の使い方はレーザを有効利用 しているのか?

レーザ電場の積極的利用 →→→ Z偏光(極)電子銃は可能? (特願2007-133183)

円筒ビームが理想系か? ~エリプソイド~ Ellipsoid)

円筒型ビームは∞長のときに空間電荷効果が線形

- SP8フォトカソードのレーザパルスは時間(20ps~6mm),空間(0.8mm) であるが、カソード上で生成される電子ビームバンチは縦横比はコンパラ。

- 円筒のエッジで非線形な空間電荷効果が生じる

• 理想的なエリプソイドパルスとは

- パルス内部は電荷密度が均一
- パルスの端に至るまで空間電荷効果は線形である
- しかし、加速度運動するとこの最適な条件が維持できない。
- カソード面の鏡映電荷を考えると、縦方向に対称なビームにならない



Water bag: Luiten スキーム(エリプソイドの発展系?)



/ ⁻ フォトカソード 自動的に3次元的に均一な エリプソイド形状のバンチに成長 Luiten, "How to electron bunch

Luiten, "How to realize uniform 3-dimensional ellipsoidal electron bunches", Phys. Rev. Letters 93, 094802 (2004)

Laser: 100 fs with parabolic transverse distribution with 1 mm radius



銅カソードの反射率の入射角依存性



レーザ光子で励起 光電子 ショットキー効果による みかけの仕事関数 電界=0のとき 乙偏光(極)強電界で ポテンシャルをベンド トンネル電子 高強度電界があるとき



ラジアル偏光ビームは、位相が $\pi/2$ ずれたTEM₀₁とTEM₁₀モードの足し合わせで、両者の偏光方向が直交している場合。



<u>円環レーザビーム生成試験</u>



焦点位置でのZ偏光強度の円環比率依存性

(ガウシアンビーム入射)



Comparison Z-polarization field dependency of R1/R0 ratio between Axicon lens pair (hollow beam generator) & simply masking central region(R1): The former is much efficient to convert to hollow beam.

分割波長板方式の分割数依存性



分割波長板を用いてレーザを集光した場合の、焦点近傍の電場強度 |E|²の分布。(a)2 分割、(b)4 分割、(c)8 分割、(d)16 分割、(e)32 分割、 (f)完全なラジアル偏光の場合。

各種金属カソードの仕事関数の電気陰性度依存性





<u>まとめと考察</u> 📭 🔍 🥌 🥌

フォトカソード表面において表面に垂直な電場を発生させ ることにより、実効的な仕事関数を下げ、従来よりも長い波 長のレーザで金属カソードをドライブできる。例えば、銅カ ソードにおいては従来、288nmよりも短い波長の光源が必 要であったが、この電子銃では倍波(395nm)を光源に用い ることができる。また、ダイアモンド(NEA)を材料に用いた フォトカソードにおいては従来226nmよりも短い波長の光源 が必要であったが、3倍波(263nm)で可能。

Ellipsoid

実際には1GV/m 以上が必要。計算結果から円環ラジアル 偏光レーザ (NA=0.15 60-% hollow ratio, inside-out Gaussian beam) を集光する場合、基本波で1.3 MW、倍波 で0.32 MWのピーク強度で、1GV/m の電場が焦点で生じ、 実効的な仕事関数~2eV程度を下げることができる。

平面レーザ電界放出型電子銃



3次元的レーザパルス整形システム



Cylindrica