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

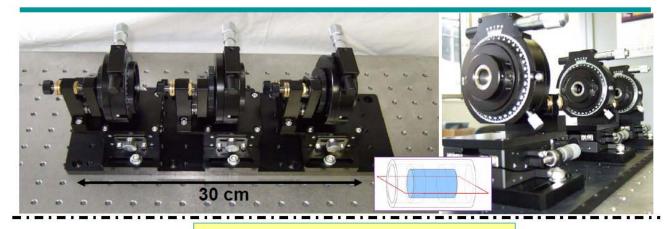
各種加速器将来計画に必要とされる超低エミッタンス電子銃の候補にフォト カソード RF 電子銃がある (SPring-8 では 1996 年に独自開発した RF 電子銃空 胴(単空胴)で研究開始、日本の他の研究所は㈱住友重工が BNL から最初に導 入した 1.6 セル空胴を用いている)。この電子銃は、レーザパルスを RF 空胴内 のカソード面に照射し生成された光電子を、RF 空胴内の高電界で電子ビームが 空間電荷効果で拡散しないうちに一気に加速し、低エミッタンス電子ビームを 生成する。レーザパルスの品質がカソード直後の電子ビーム品質を左右するた め、エミッタンスはレーザ技術に依存するところが特に大きい。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。

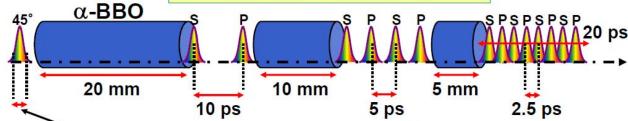
この整形されたレーザパルスで生成した電子ビームの規格化水平エミッタンスは、 1.4π mm mrad (0.38 nC)、 2.0π mm mrad (1.0 nC)であった。

パルス・スタッキングロッド方式

Cylindrica



UV- chirped pulse stacking rods



、※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。

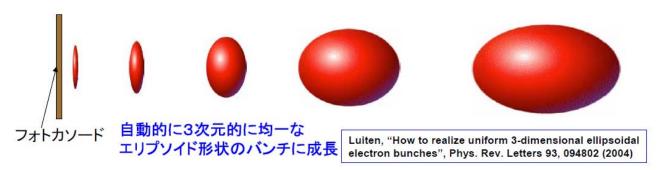
SPring-8 加速器部門では、上に述べたような円筒型3次元パルス形状だけで なく、極低エミッタンスビーム実現のために有効であると世界で繰り返し提唱 されているラグビーボール型 (エリプソイド形状: KV-distribution) のための 方法も何種類か提案、および実施している。これは円筒型パルス整形による非 線形な空間電荷効果の抑制は、円筒型パルスがビーム進行方向に無限に長く、 端の効果が無視される時に実現されるのであって、現実にカソード直後に生成 されるバンチの縦横のアスペクト比は1:1に近く、この前提はここで崩れて しまっている。㈱浜松ホトニクスとの共同開発中の透過型ダイヤモンドと 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。

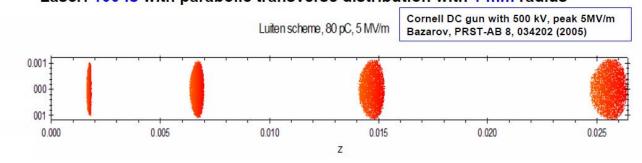
これを解決する案として Luiten スキームというものが提唱されている。これはフェムト秒の超短パルスから出発し、空間電荷効果によるビーム広がりを逆手にとって自然にエリプソイド形状を加速にしたがい理想形状に成長していく条件を見出そうとするものである。シミュレーション結果では、100pC 以下のバンチ電荷の時にこのような解が存在するという報告がある(下図参照のこと)。しかし、実際のカソードを無視すればこのような理屈は成り立つかもしれないが、フェムト秒の応答性をカソードに要求する時点で金属カソードに限定されてしまう。そうすると量子効率が悪いために高強度レーザパルスを超短パルスに圧縮して照射すること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

フェムト秒レーザでのエリプソイドビーム生成:

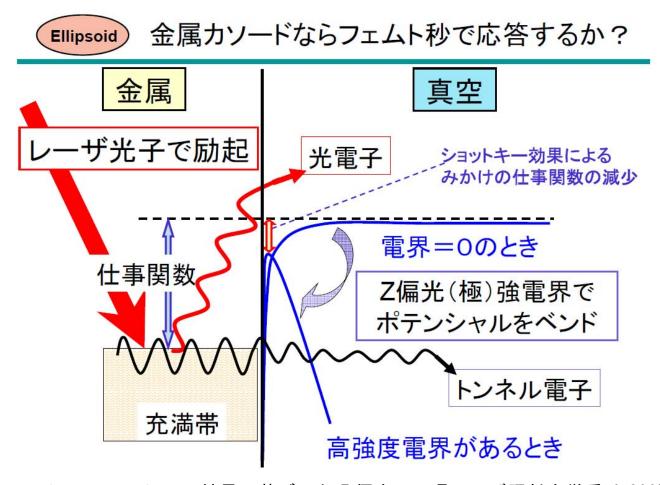


Laser: 100 fs with parabolic transverse distribution with 1 mm radius



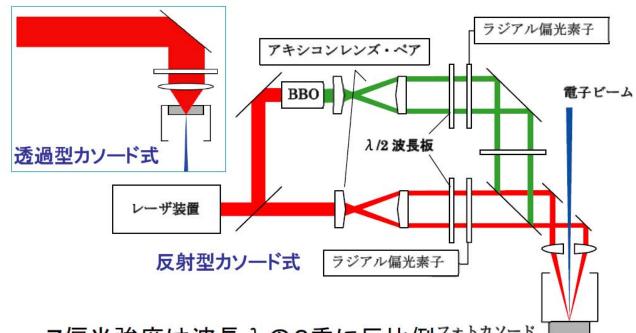
少し話は飛ぶが、私は以前からフォトカソードが利用する光電効果に果たしてレーザは必要なのか?と問うてきた。ランプのような照明光のほうが均一な光源であるし、ワーキング・ディスタンスが稼げないなら単に背面照射可能なカソードを開発すれば良いだけである。このような考え方から先述のファイバーバンドル整形の発明に至った訳であるが、逆にレーザ光源の能力を 100%有効利用しているのか?という疑問も同時に生まれた。レーザがコヒーレント光源であることを逆に利用できないかと考え、超短パルスにした時の高強度電場の有効利用しようと考えた。そこでショットキー効果で実効的に仕事関数を下げ

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。

平面レーザ電界放出型電子銃



- ・Z偏光強度は波長λの2乗に反比例。
- ・Z偏光強度はレンズのNAのほぼ4乗に比例 (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
 - ・Z偏光について 実際の光学系とその発生原理
 - ・電子銃としての動作試験方法







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、バンチャーが必要。

電子の生成方法 → 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熱電子放出を利用。

カソードの温度 ~ 1000℃

フォトカソード電子銃

・・・・ 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

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



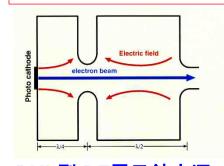
フォトカソードRF電子銃

従来の入射器としてのライナックには、蓄積リングの飽和エミッタンス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。

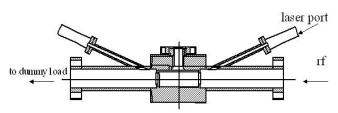
低エミッタンスビームの要請 ⇒ 新型電子銃の開発

1980年台半ば、定在波型RF空洞内壁で電子を直接発生させるRF 電子銃をLos AlamosのFraserとSheffieldが提唱。



BNL型 RF電子銃空洞

(カソード表面電界:~100MV/m)



SP8 RF電子銃テスト空洞 (カソード表面電界: 175MV/m)

SPring-8 RF電子銃の特徴

レーザ源

- •Ti:Saレーザ3倍波 (263nm)
- 高安定レーザ 263nmにて<1.4%(rms)
- ・レーザパルス三次元形状の制御 トランスバース:可変形補償ミラー使用 時間方向:パルススタッカ使用

冨澤

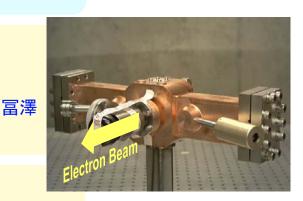
ビーム・ダイナミクス シミュレーション: 水野

RF空胴

- •2856MHz 単空胴型(低Q) 谷内
- ・カソード:空胴壁(Cu)

またはカートリッジ型

·高電界(190MV/m達成)、低暗電流



RFとレーザの同期

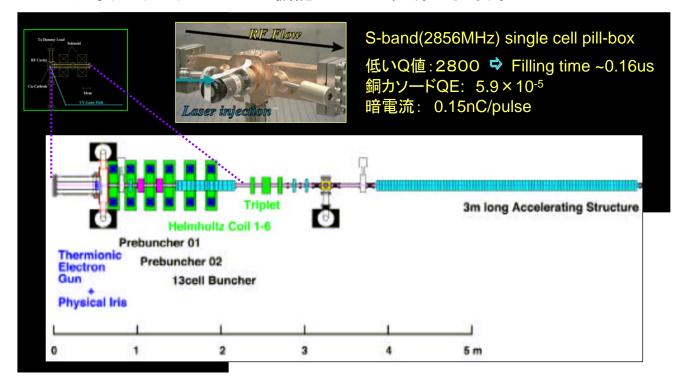
- •RF信号(2856MHz)をレーザパルス (89.25MHz)から生成
- •RMSジッタ < 100fs

出羽

大熊 加速器部門長 花木 高品質ビームTL

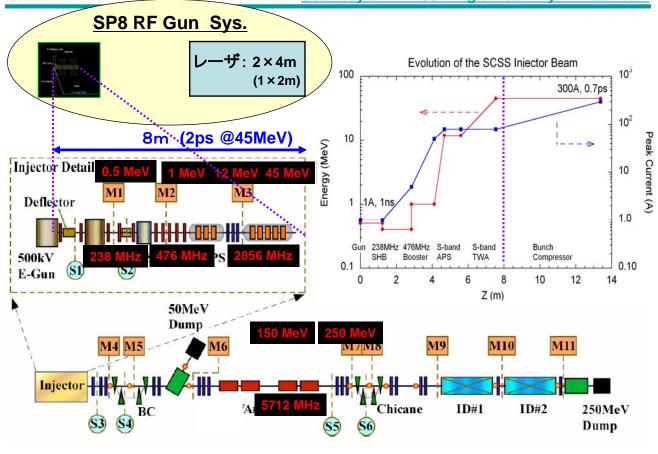
現SPring-8 Linacの熱電子銃を光電子銃で置き換えると・・・・

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熱力ソード入射部 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。

レーザ技術は加速器にとって

~レーザの安定化は克服すべきこと~

・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

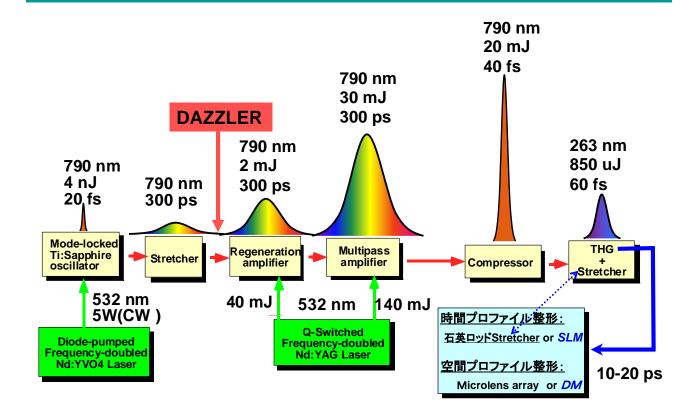


SPring-8 RF電子銃の歴史

- 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 3D-laser 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

温調水プレート開発



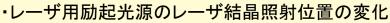
重要性

- 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





- 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



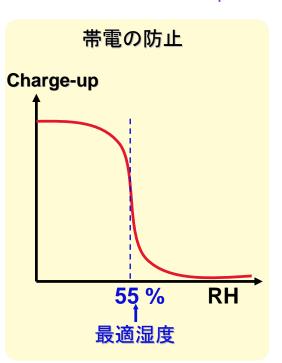


環境試験室を兼ねる恒温恒湿クリーンルーム

2003年~







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

ビームエミッタンス増加の要因



$$\sigma = \sqrt{\sigma_{SC}^2 + \sigma_{RF}^2 + \sigma_{Th}^2}$$

Space charge effect consists of:

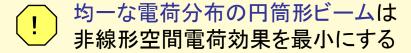
- 1. Linear term in radial directionpossible to compensate with Solenoid Coils
- 2. Non-linear term in radial direction
 possible to suppress non-linear effects
 with optimization of ideal Laser Profile



エミッタンス増加の抑制



空間電荷効果によるエミッタンス増加を最小に





レーザパルス3次元形状の最適化

最終的には電子ビームが理想的な形状となるようレーザビームの 形状制御を行なう → カソード量子効率不均一も補正

トランスバースプロファイル:強度分布が均一な円形

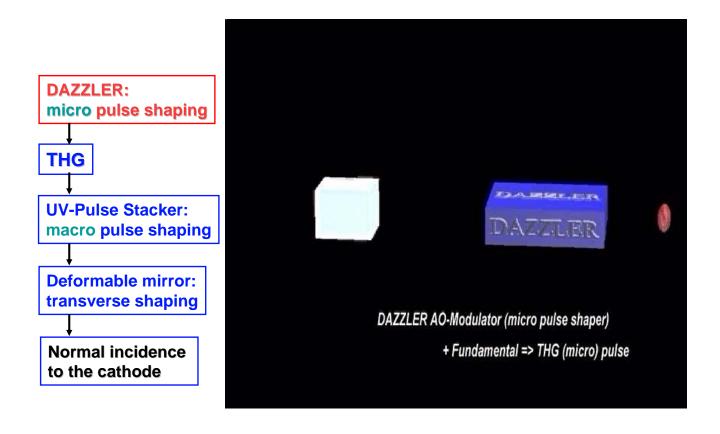
時間プロファイル:矩形パルス

パルス幅20ps(シミュレーションによる)

いずれのプロファイルもカソード面上で実現が必要

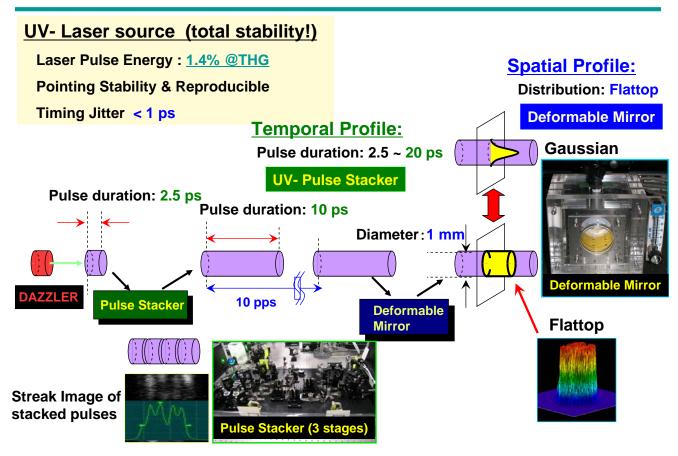
3次元的レーザパルス整形システム





円筒型レーザパルス整形システム





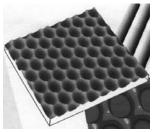
トランスバースプロファイルの整形



■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)

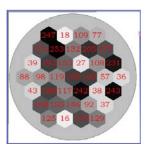
可変形補償ミラー (Deformable Mirror)

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

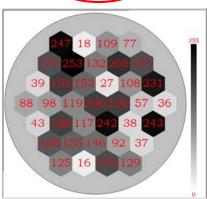
トランスバースプロファイルの整形



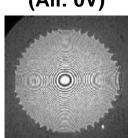
Deformable Mirror Actuatorの構造

Actuator:

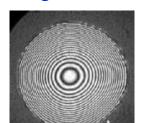
23 42 25 26 22 10 11 12 27 21 9 3 4 13 28 20 8 2 1 5 14 29 37 19 7 6 15 30 36 18 17 16 31 35 34 33 32



Initial State (AII: 0V)



AII: 255V (Max. Voltage)



Voltage: 0 ~ 255 V

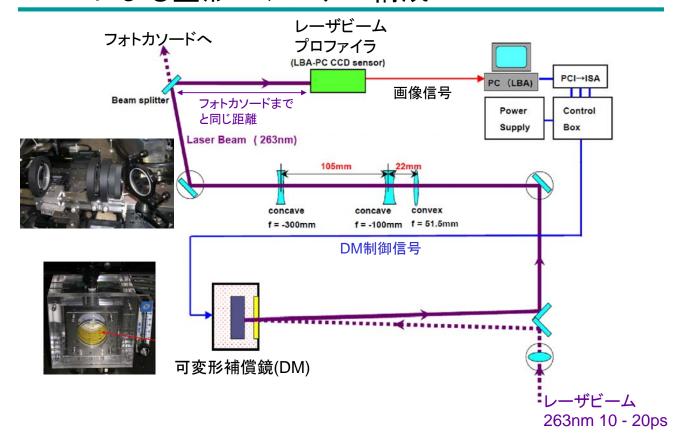
AII: 125V



Random Voltage

DMによる整形 - システム構成





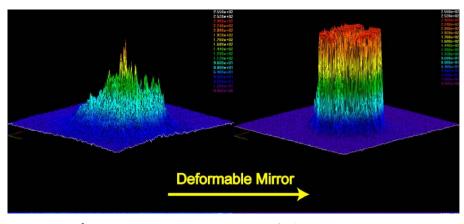
DMによる整形結果



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

- ・遺伝的アルゴリズム(福井工業技術センターと共同研究) により2~3時間でゴールへ
 - ・レーザ源安定化により時間を要する制御が可能に



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~CW対応可能な時間プロファイルの整形

■石英ロッドによる紫外レーザのパルス伸長

Cylindrical

入射したレーザパルスのスペクトルが、まず石英の非 線形分散効果により広帯域化し、石英ロッドの長さに 比例して伝搬中にパルス幅は伸びる

- レーザのエネルギーによってパルス長が異なる
- ・パルス長はパルス・エネルギー依存、時間プロファイ ル形状の調整不可
- ■石英板空間位相変調器(SLM)を用いる方法[§]
 - •レーザパルスのスペクトルに位相変調を与え、 パルス波形を自由に制御
 - 紫外レーザには非実用的、ハイパワー赤外レーザに有効
 - ・レーザパワーを20%しか利用できず、非効率的

■パルススタッカーを用いる方法

- 短パルスを次々に連ねて長いパルスを合成する方法
- パルススタッカー以降のパルス伸長を考慮した短パルス の生成が難しい
- + DAZZLERで解決!

1500

2000 UV-Laser Fluence [uJ/cm2]

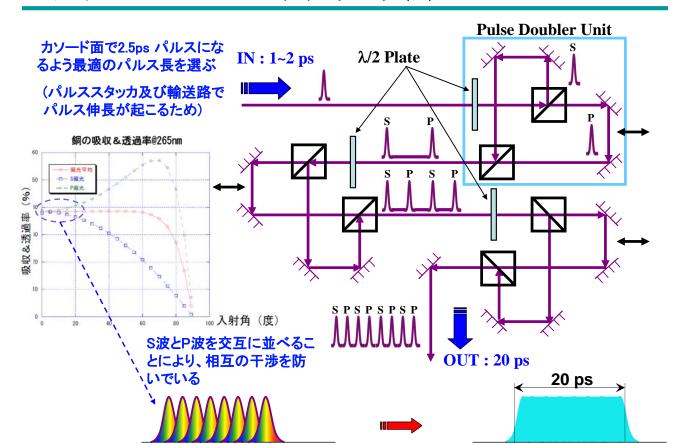
・調整は難しいが、現状では矩形レーザパルスを生成する唯一の実用的方法

複屈折結晶ロッド型の開発!

1000

チャープパルス・スタッキング法

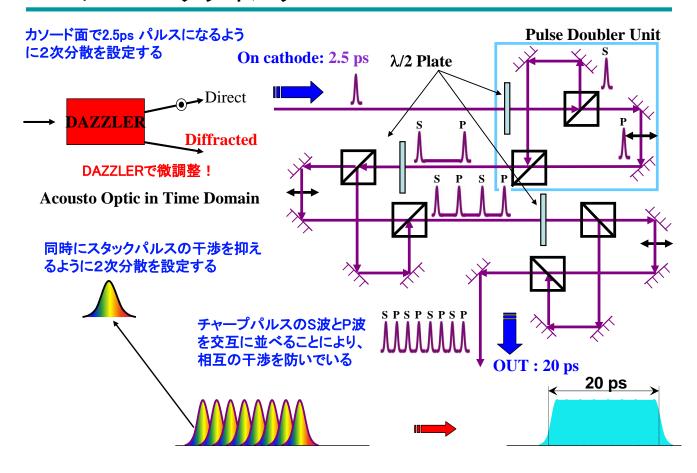




% 70 50 40

パルス・スタッキング + DAZZLER

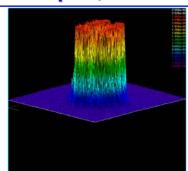




UVレーザパルス(THG)の3次元形状

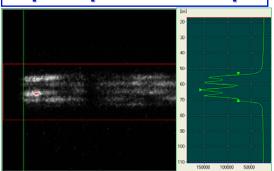


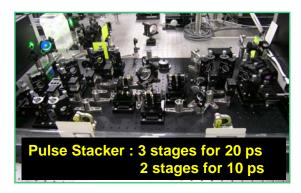
Flattop: ϕ 0.8 mm



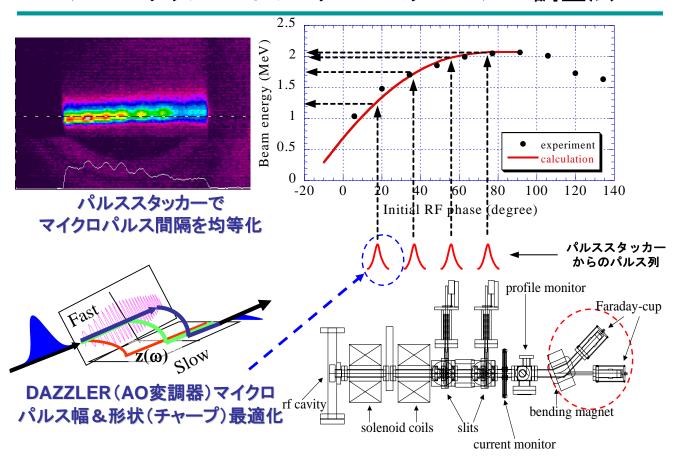


Square pulse: 10~20ps





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



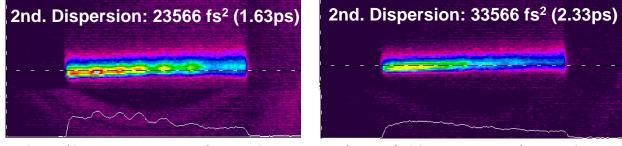
パルススタッカーの調整

- ・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!)
- ・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 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

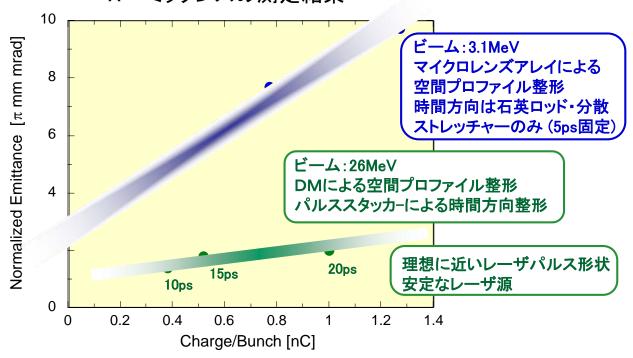


左:分離しているマイクロパルス 右:マイクロパルスが重なって一つのパルスになる

SPring-8 RF電子銃 - 超低エミッタンスへ

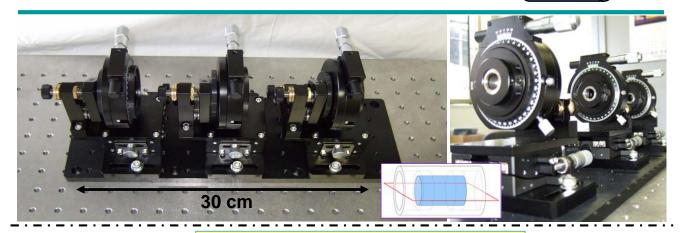


X エミッタンスの測定結果

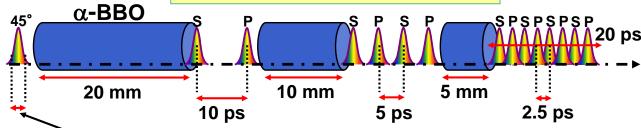


パルス・スタッキングロッド方式





UV- chirped pulse stacking rods



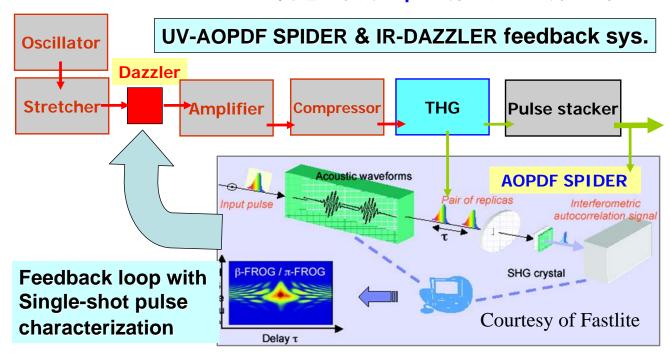
、 ※入射パルス幅は全結晶ロッドの分散で伸長後に2.5 psになるように調整する。 また、互いに45度回転した各前段ロッドの結晶軸で規定される、互いに直交する 偏光チャープパルスをそれぞれ図中に記号SとPで表す。

UVパルス形状の計測・フィードバックへ



UVパルス形状計測:

ストリークカメラではサブピコ秒の分解能しかないため、 ダイナミック・レンジの問題もあり、20psの矩形計測は難しい。



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 ー> 5ps @800nm

200psレンジ -> 2ps @800nm

100psレンジ -> 1ps @800nm FESCA200の場合

50psレンジ -> 500fs @800nm

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10 μ m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]

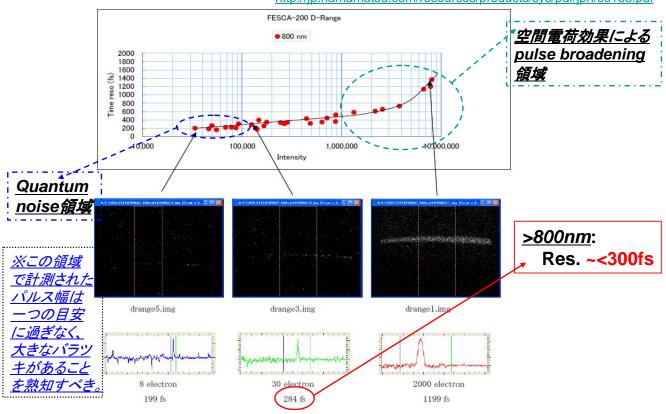
500nm: 時間分解能 ~500 fs (FWHM) [参考值] 266nm: 時間分解能 ~600 fs (FWHM) [参考值]

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。

800nm; 100fs laser

FESCA200でのパルス幅(FWHM)の波長依存性

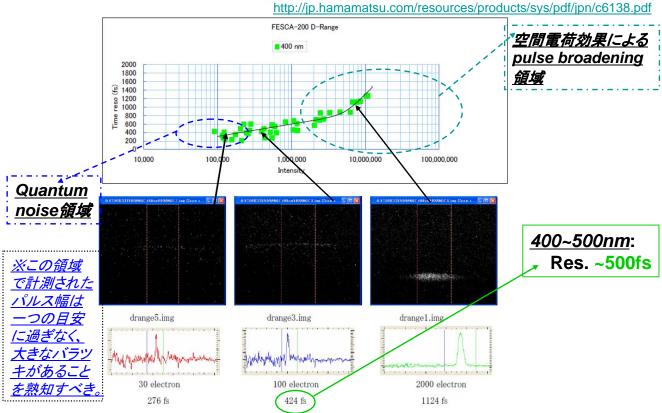
参考データ2 C6138 における波長 800nm のダイナミックレンジ C6138のカタログ掲載データ例 http://jp.hamamatsu.com/resources/products/sys/pdf/jpn/c6138.pdf



400nm; 100fs laser

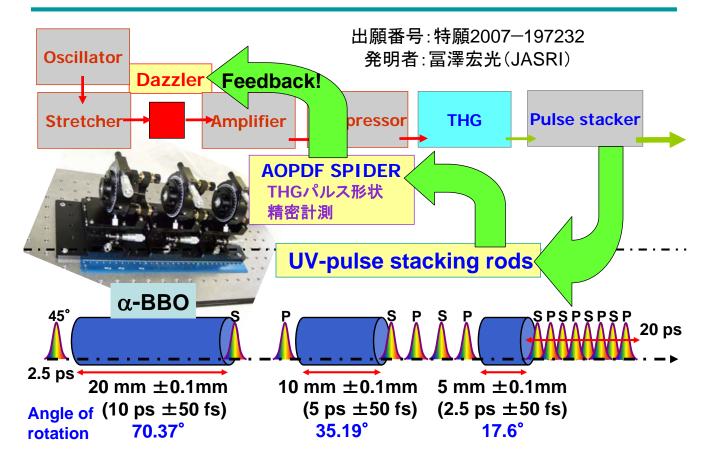
FESCA200でのパルス幅(FWHM)の波長依存性

参考データ1 C6138 における波長 400nm のダイナミックレンジ C6138のカタロク 掲載テータ例



円筒型パルス形状の最終形態





Cylindrica

円筒型パルス整形のまとめ

Cylindrica

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。

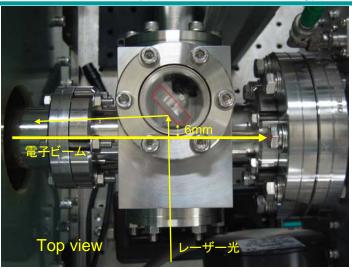
これにより、テラワット級レーザ源を加速器用として実用運転する見通しが立った。

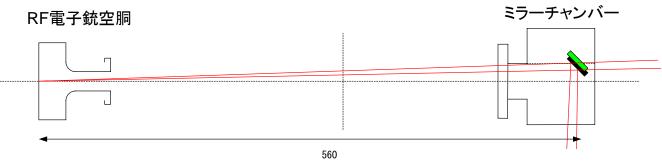
レーザー直入射ミラーの影響

~特にハイ・チャージの場合~

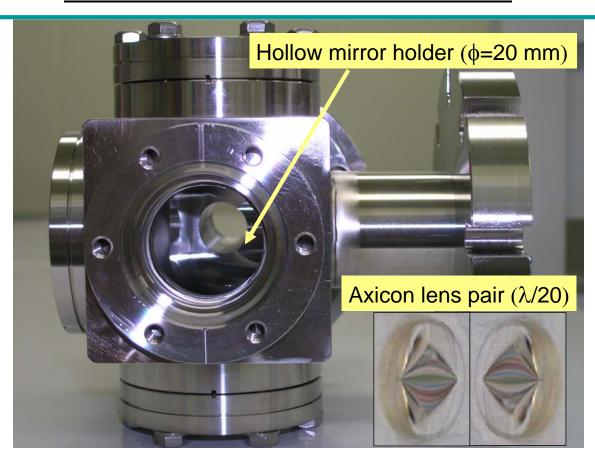
カソード面より560mm下流にある レーザー直入射用ミラー ↓ ビーム軸との最短距離 ~ 6 mm

ビームを削る Wakefield





ホロー入射ミラー・チェンバー



MAFIAによりシミュレーションを行ってみると

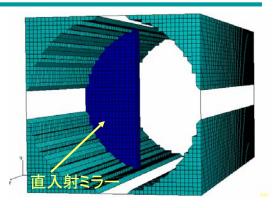
シミュレーション形状

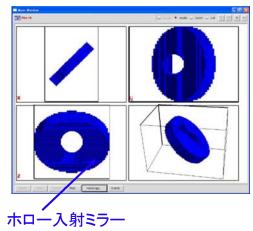
直径40mm, 長さ100mmのパイプ ビーム軸に垂直な金属板 ビーム軸より6mm

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)

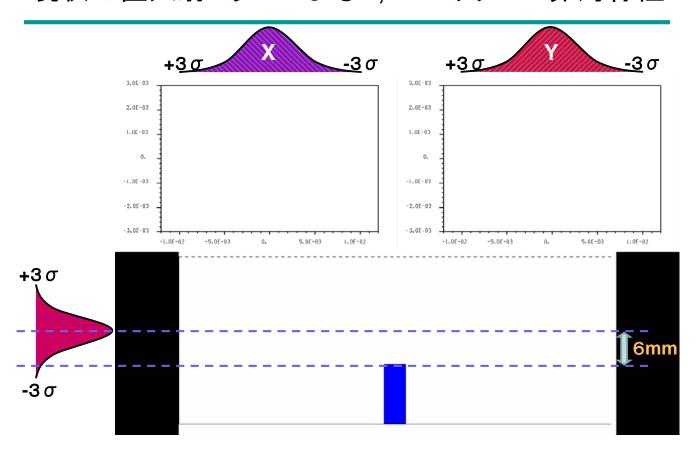
電荷量 0.83 nC エネルギー 3.6 MeV

縦プロファイル 4.5 ps (1σ) , $\pm 3\sigma$ 横プロファイル 3.5 mm (1σ) , $\pm 3\sigma$



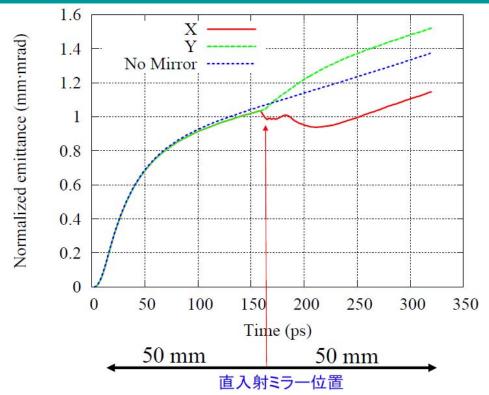


現状の直入射ミラーによるX,Yエミッタンス非対称性



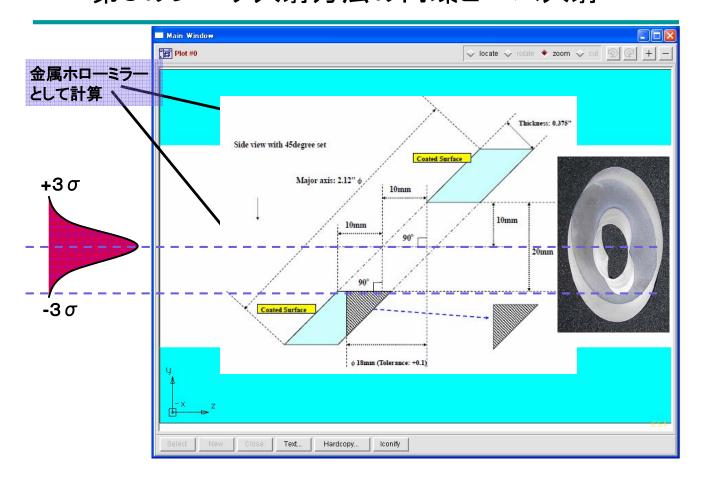
水平方向に直入射ミラーを入れた場合のエミッタンス

(直入射ミラー近傍の振る舞い)



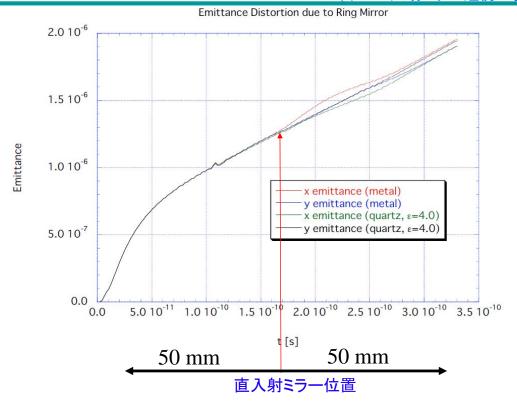
Yエミッタンスが大きいという実験結果と、傾向は一致

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)

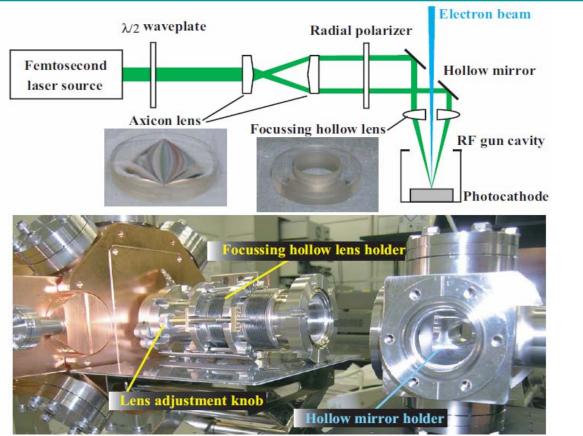


金属ミラーではなく誘電多層膜ミラーにすると影響がほぼ無いことを確認

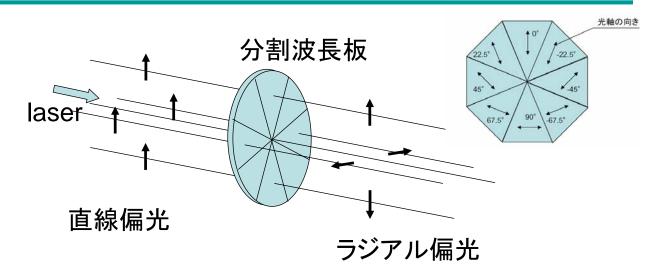


Z偏光電子銃試験装置。





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(株)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。。。

~干渉光源であるレーザ使用の功罪を問う~

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? ~ェリプソイド~

- 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

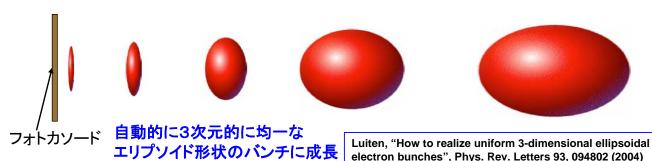
$$\frac{x^2}{R^2} + \frac{y^2}{R^2} + \frac{z^2}{L^2} = 1.$$

$$E_r = \frac{-\rho_0}{2\varepsilon_0} \left(1 - \frac{g_0}{2} \frac{R^2}{L^2} \right) r = -f(Q, R, L, \gamma) r.$$

$$E_z = \frac{\rho_0}{\varepsilon_0} M_e z.$$

Water bag: Luiten スキーム(エリプソイドの発展系?)

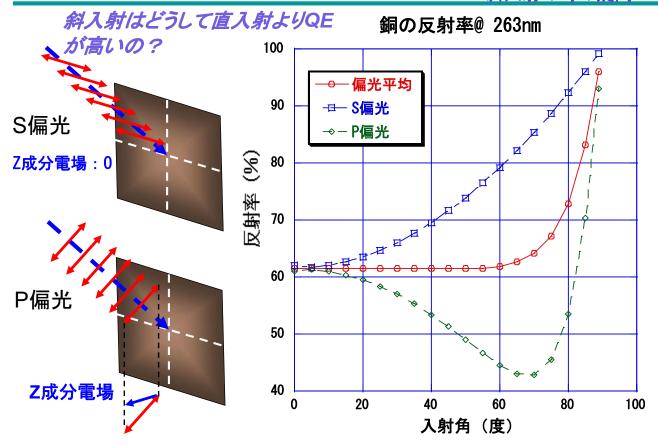
フェムト秒レーザ照射でのエリプソイドビーム生成:

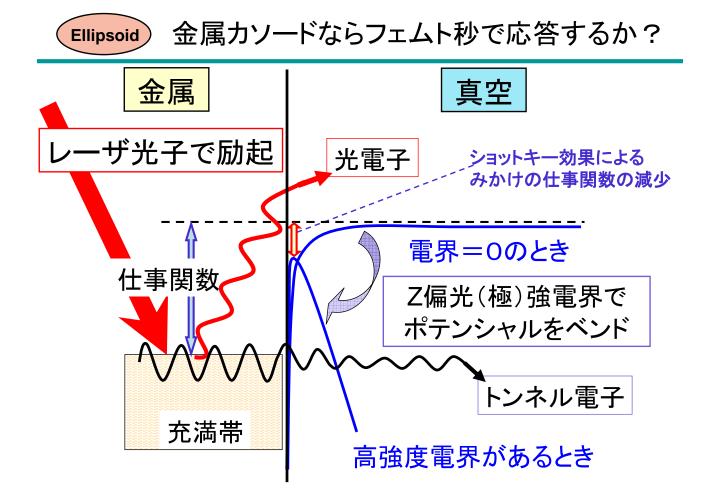


Laser: 100 fs with parabolic transverse distribution with 1 mm radius

銅カソードの反射率の入射角依存性

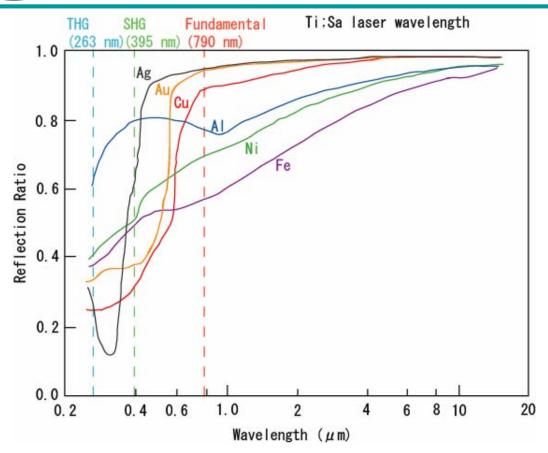
~斜入射の時の疑問~







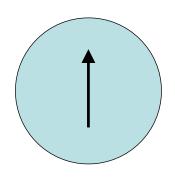
各種金属カソードの反射率の波長依存性



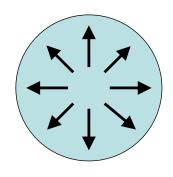


ラジアル偏光ビーム(Z偏光の素)

レーザービームの断面



直線偏光ビーム

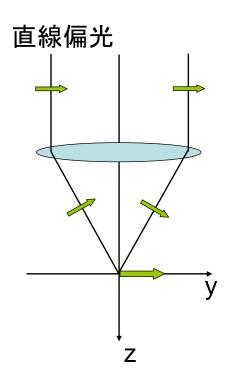


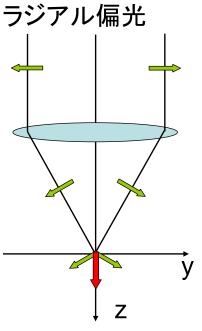
ラジアル偏光ビーム

ラジアル偏光ビームは、位相が $\pi/2$ ずれた TEM_{01} と TEM_{10} 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。



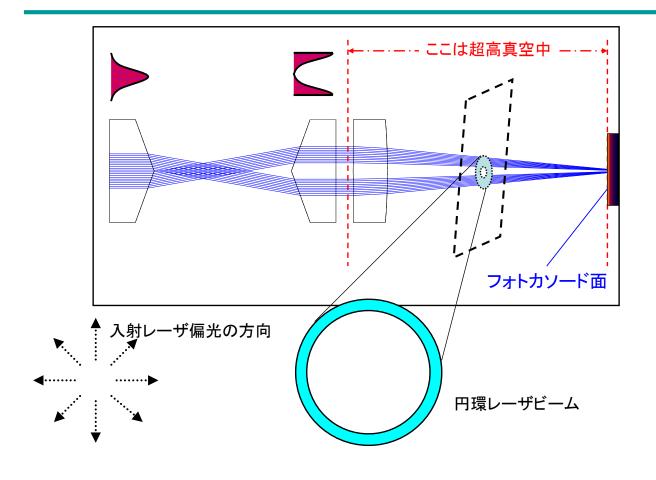
Ellipsoid ラジアル偏光ビームの集光



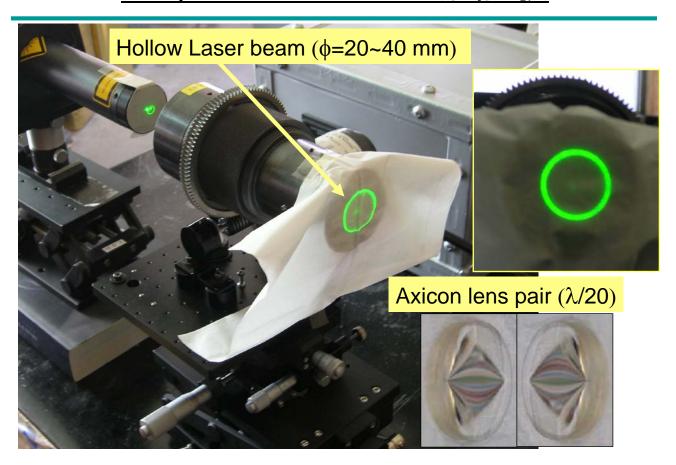


焦点において光軸方向の 電場成分が強めあう

円環レーザビームへの変換はアキシコンレンズで行う

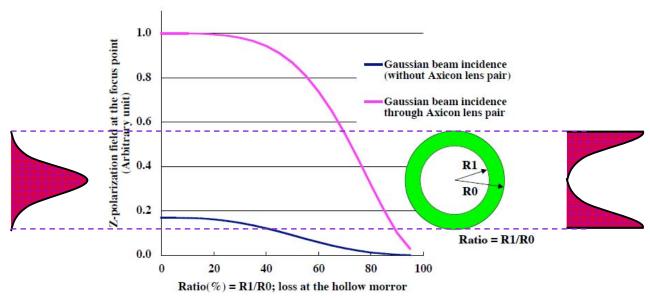


円環レーザビーム生成試験



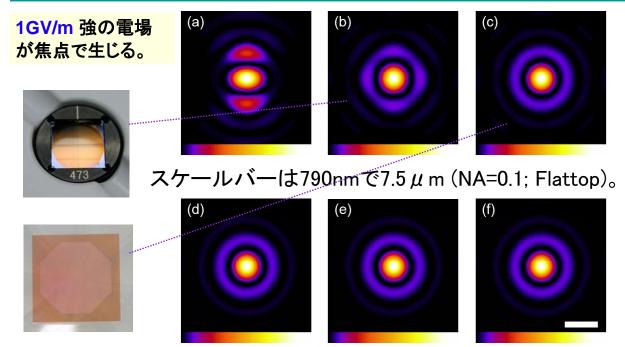
焦点位置でのZ偏光強度の円環比率依存性

(ガウシアンビーム入射)



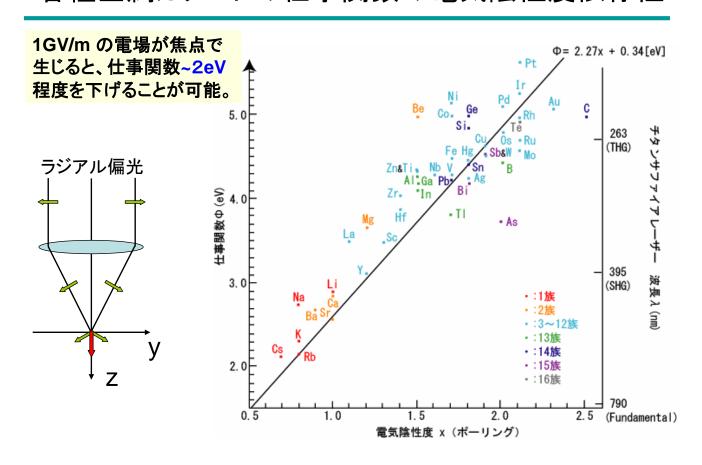
Comparison Z-polarization field dependency of R1/R0 ratio between Axicon lens pair (hollow beam generator) & simply masking central region(R1): The former is much efficient to convert to hollow beam.

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。

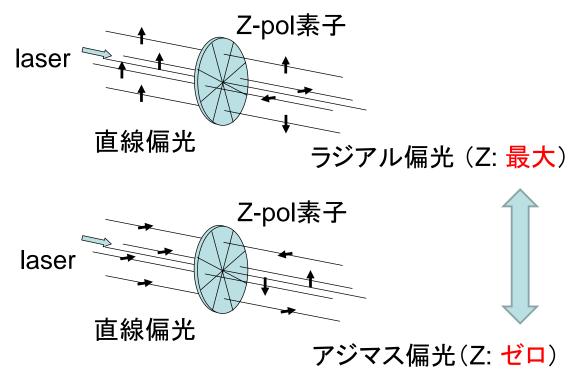
各種金属カソードの仕事関数の電気陰性度依存性





Ellipsoid ラジアルおよびアジマス偏光の比較

レーザ集光密度を一定にし、Z偏極電場強度だけ を変化させることで、多光子吸収過程と区別。





まとめと考察・・



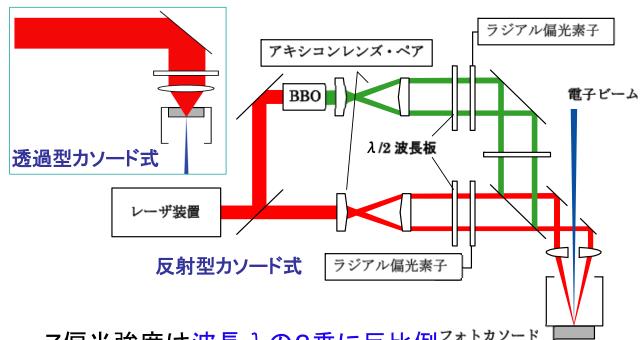




フォトカソード表面において表面に垂直な電場を発生させ ることにより、実効的な仕事関数を下げ、従来よりも長い波 長のレーザで金属カソードをドライブできる。例えば、銅カ ソードにおいては従来、288nm よりも短い波長の光源が必 要であったが、この電子銃では倍波(395nm)を光源に用い ることができる。また、ダイアモンド(NEA)を材料に用いた フォトカソードにおいては従来226nm よりも短い波長の光源 が必要であったが、3倍波(263nm)で可能。

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



- ■Z偏光強度は波長λの2乗に反比例。
- ・Z偏光強度はレンズのNAのほぼ4乗に比例 (焦点距離の4乗に反比例)

Spring-8 RF電子銃施設の将来計画

RF電子銃ビームの線型加速器への入射 (擬等時性リングNSフェムト秒バンチビーム周回計画)



3次元的レーザパルス整形システム



