

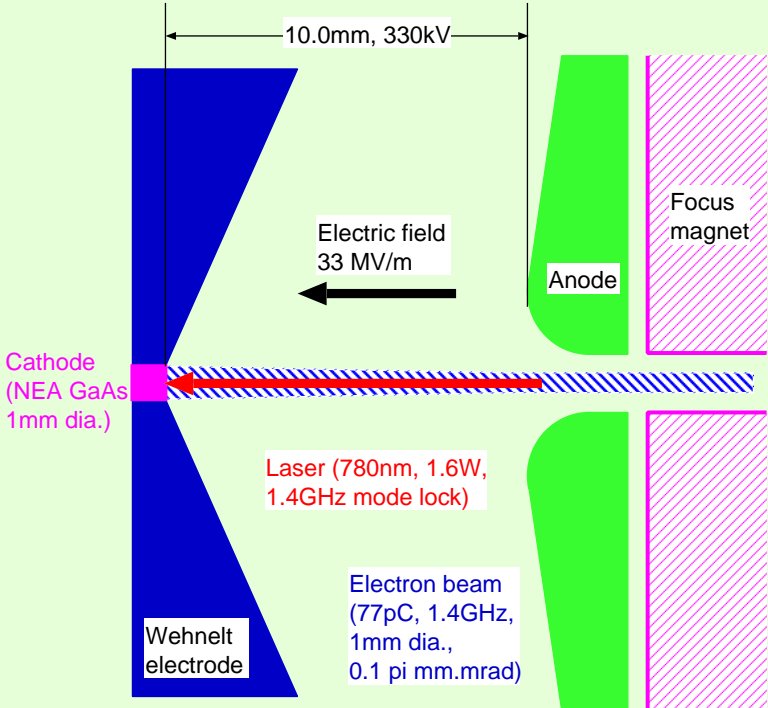
ERL 電子銃の技術的検討

高エネルギー加速器研究機構 栗木雅夫

DC 光電陰極電子銃

- NEA GaAs 光電陰極による 1mm 径、バンチ長 20ps、エミッタンス 0.1π mm.mrad、電荷量 77pC というビームの生成。
- 1.59W、780 nm、1.3GHz モードロックレーザーによる 1.3GHz 周期での連続ビーム生成。
- 330 kV/1 cm (33MV/m) という超高 DC 場での空間電荷制限状態でのビーム引出し。
- 2ps へのバンチ圧縮。

ERL 電子銃の案



NEA GaAsの現状

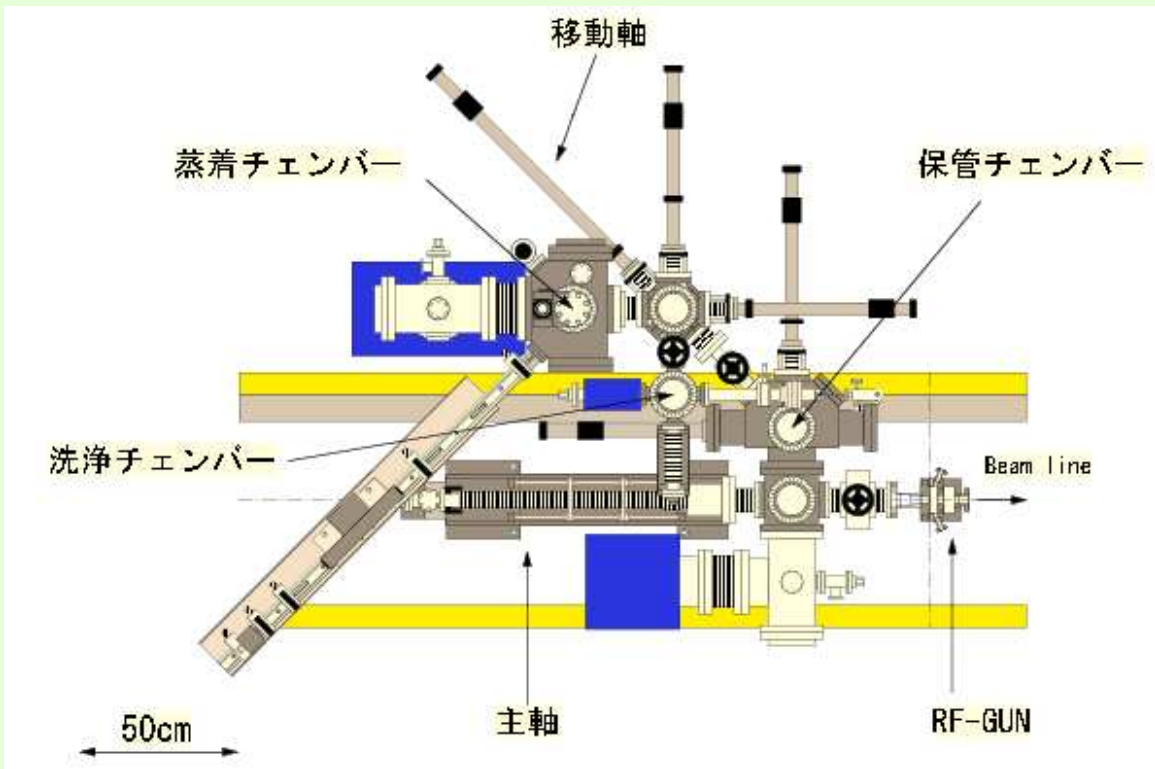
- 生成直後の量子効率 $\geq 10\%$ を超える。
- 時間、あるいは発生ビーム電荷量にしたがい量子効率は低下。その主要因はイオンによる逆流被曝、およびそれによる真空悪化。
- また逆に高真空 (10^{-10}Pa) を維持すれば寿命は真空度の向上に従ってのびることが判っている (SLAC, JLAB, 名古屋などの共通認識)。
- 寿命 $1.0 \times 10^6 \text{C/cm}^2$ (1mm径の陰極面積、100mAで25時間) 以上を目標とする。

真空度の向上

- 基礎真空度の向上：内壁に Ti を用いてそれを冷却することで構造そのものを真空ゲッターとして用いる。あるいは電子銃まわりに NEG を大量に配置する。
- 暗電流による真空悪化の抑制：33 MV/m (予定電圧)において暗電流を $1\text{nA}/\text{m}^2$ 以下とする高耐圧材料、表面、加工技術の確立。

NEA GaAs 生成システム

- NEA 表面は大気暴露により破壊されるため、真空中で生成しそのまま電子銃へ装着しなければならない。
- ATF では名古屋大学と共同で CsTe 光電陰極を用いた RF Gun コンプレックス (電子銃空洞、陰極生成・輸送系、モードロックレーザー) を開発して昨年末より運転中。1% を超える量子効率での定常運転を実現している。
- この CsTe 陰極生成・輸送系が基本的に NEA GaAs に応用可能である。ただし CsTe に比べて NEA GaAs は真空の制限が厳しいために真空度の全体的な向上は必要である。



ビーム取り出し

空間電荷制限状態でのビーム取り出しを考える。

電子銃のパービアンス P は極間隔 d と陰極面積 S により

$$P = 2.33 \times 10^{-6} \frac{S}{d^2} (A \cdot V^{-3/2}). \quad (1)$$

d を 1cm、 S を $7.9 \times 10^{-7} m^2$ (ビーム径 1mm に相当) とすると、 $P = 1.83 \times 10^{-8} (A \cdot V^{-3/2})$ 。

ビーム電流 J はパービアンス P と陰極-陽極間電圧 V_A により

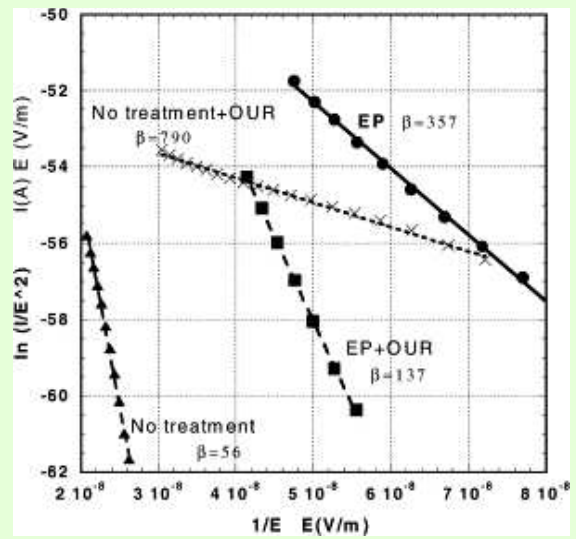
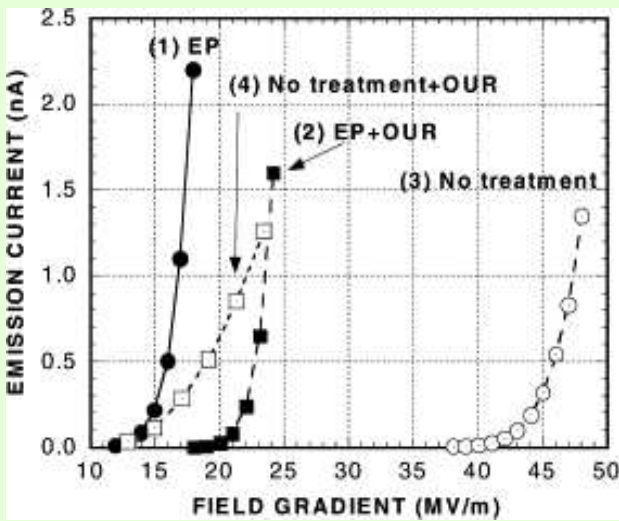
$$J = PV_A^{3/2}. \quad (2)$$

3.9A のピーク電流 (77pC/20ps) を得るためには $V_A = 330kV$ が必要となる。その時の陰極の表面電場は 33 MV/m である。

DC 高圧電子銃

- ビーム取り出しのためには陰極表面電場 33 MV/m が必要。
- 空間電荷によるエミッタンス増大の抑制にも高圧取り出しが有効。
- 330 kV 高電圧発生に問題はない。
- 暗電流 1 nA/m^2 未満に抑えたうえで上記の電場が達成できるかが問題だが、SUSで 34 MV/m 、Cuで 40 MV/m 、Tiにより 70 MV/m 程度まですでに達成している (鈴木、古田他)。

暗電流測定 (Cu)

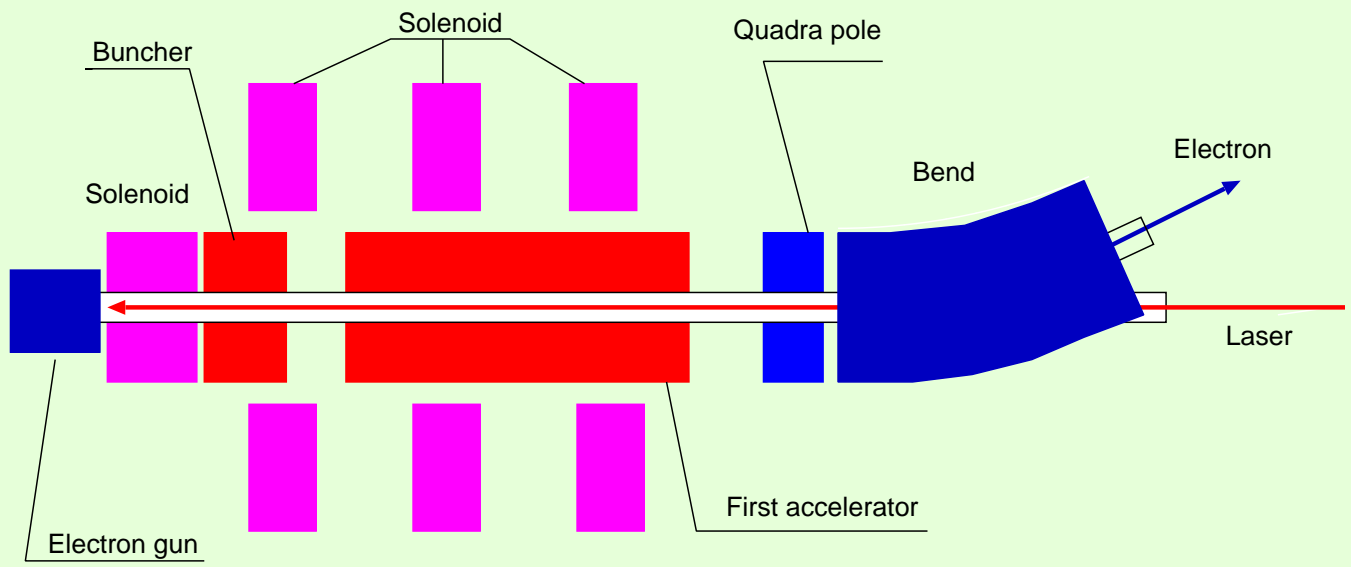


C. Suzuki et al., Nucl.Instrum.Meth.A462:337-348,2001

空間電荷によるエミッタンス増大の抑制

- 均一な電荷分布による線型空間電荷効果は適切な収束場(ソレノイド磁場)によって抑制が可能。
 - 電荷分布の均一化～10%が必要。電子銃を空間電荷制限状態で運転することで達成可能か。
 - 理想的なソレノイド磁場を作ることは困難。
- ソレノイドによる抑制の破れによりエミッタンス増大が発生。
 - 線型空間電荷効果におけるソレノイド磁場の不全。
 - 非線型空間電荷効果。
 - 効果は $1/\gamma^2$ に比例。より高いDC電場による引出しが有効。
- バンチングにより電荷密度が上昇するため、それにソレノイド磁場を最適化しないとエミッタンス増大が発生。シミュレーション等による検証が必要。

入射部の例



レーザー

平均電流 $I[mA]$

$$I[mA] = \frac{\lambda_L[nm]}{124} P_L[W] \eta[\%], \quad (3)$$

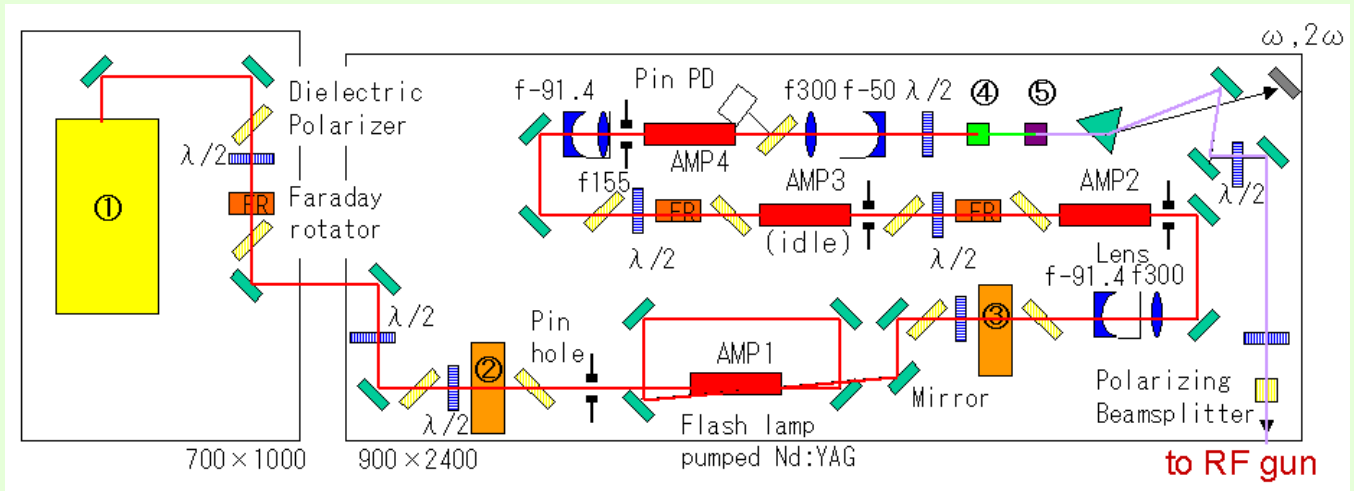
- $\lambda_L[nm]$: レーザーの波長
- $\eta[\%]$: 量子効率
- $P_L[W]$: レーザー出力

$I = 100mA$, $\lambda_L = 780nm$ (Ti:sapphire), $\eta = 10\%$, とすると必要な出力は **1.59W**。

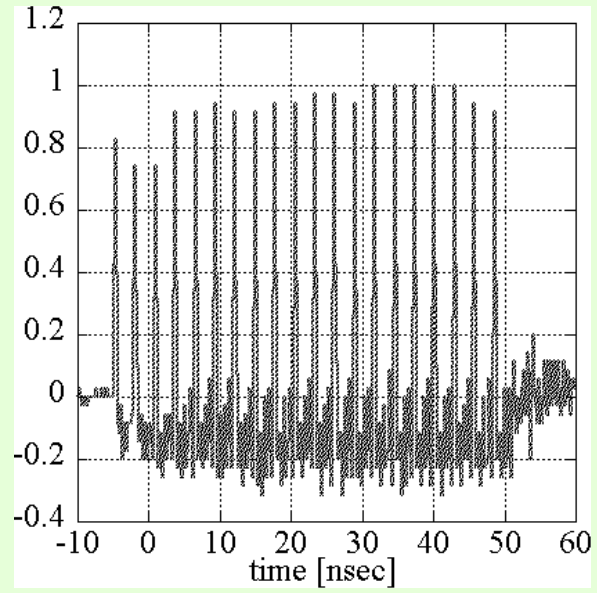
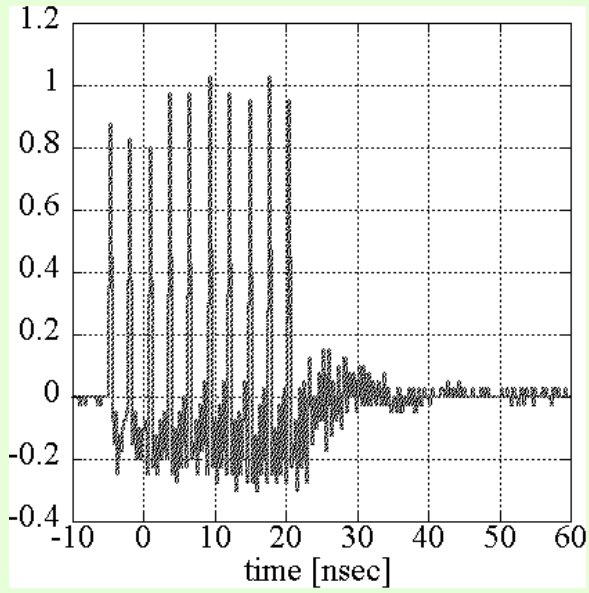
CsTe陰極マルチバンチUVレーザー

- Nd : YVO₄ 500 mW 357 MHz mode lock laser (1024nm, IR)。
- Pulse clipping (1-100 bunches) with Pockels cell.
- Nd:YAG amplifiers.
- UV conversion (SHG, FHG).
- Typically, 1-5 μ J/bunch, 12ps。
- 量子効率1%により 2-10 nC/bunch を実現。実際は放射線安全の制限により 1nC/bunch程度で運転。

ATF マルチバンチレーザーレイアウト



RF Gun with CsTeによるマルチバンチ発生



ERL 電子銃レーザー

- 1.3GHz mode lock, 780 nm, 20ps。
- 量子効率 10%を仮定すると、1.6W, 1.2nJ/pulseが必要。充分に実現可能である。(CsTe マルチバンチレーザーでは $1\mu\text{J/pulse}$ 以上)
- パルス毎の出力の安定度、位置の安定性については電子銃を空間電荷制限状態で運転することで逃げる事ができる。
- 位相 (時間) 安定性については、1.3GHzによる加速電場の変化が0.1% 以内となることを要請すると、6ps以内となる。0.01%を要請すると 1.6psとなる。いずれにしる達成可能か。

まとめ

- NEA GaAs陰極を用いた ERL 電子銃の実現性について検討。
- NEA GaAs陰極の寿命については真空度を極限まで高めることで $1.0 \times 10^6 C/cm^2$ (1mm 径、100mA で 25時間) 以上を目指す。
- NEA 表面の生成、輸送システムについては ATF-名古屋の CsTe システムが応用可能である。
- 極間電圧 330kV、極間隔 1cm、表面電場 33MV/m で空間電荷制限状態での電子発生。

まとめ(つづき)

- 上記電場にて暗電流 $1nA/m^2$ 以下、高真空 $10^{-10}Pa$ は十分に可能。
- バンチ内の電荷密度の均一度、バンチ毎の密度・位置の安定性については、空間電荷制限状態での運転で実現可能。
- 空間電荷効果によるエミッタンス増大の抑制はバンチングの際の密度変化に最適化したソレノイド磁場を実現できるかが鍵。要検討。
- 1.3GHz モードロックレーザー、出力1.59Wは実現可能。レーザーの安定性も空間電荷制限状態で電子発生は決ってしまうため、あまり問題とならない。