

ERL 中間報告、電子銃

高エネルギー加速器研究機構 栗木雅夫、大沢哲

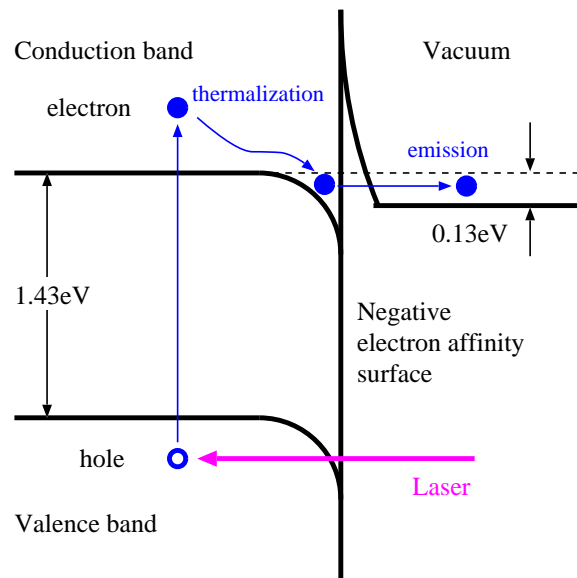
DC光陰極電子銃

- NEA GaAs 光電陰極による極小初期エミッタンスビームの生成。
- 1.3GHz モードロックレーザーによる 1.3GHz 周期での 20ps 長の連続ビーム生成。
- 330 kV/1 cm (33MV/m) という超高 DC 場でのビーム引きだし。
- 2ps へのバンチ圧縮。

電子親和度 (Electron Affinity)

- PEA(Positive Electron Affinity) 表面
 - 伝導帯準位が真空準位よりも低い表面状態。
 - 伝導帯に励起された電子のほとんどは伝導帯にとどまり、やがて正孔と再結合。低量子効率。
 - レーザーエネルギーを仕事関数よりもある程度高く取る必要。
- NEA(Negative Electron Affinity) 表面
 - 伝導帯準位が真空準位よりもわずかに高い表面状態。
 - 伝導帯に励起された電子の多くが真空中へと放出。高量子効率 ~ 10% が可能。
 - レーザーエネルギーを仕事関数にあわせこむことが可能。

NEA GaAs 表面



レーザーのエネルギーを放出限界までに絞りこむことで光電子の初期エネルギーは 0.025eV までに低下。(S. Pastuszka 1997)

横方向のエミッタンス

$$\varepsilon_x = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{(h\nu - \phi_0 + C_s \sqrt{E})}{3mc^2} + \frac{kT}{mc^2}}, \quad (1)$$

- R : ビーム径
- $h\nu$: レーザー光子エネルギー
- ϕ 仕事関数
- C_s : Shottky 効果を表す係数
- E : 表面電場

PEA金属カソードにおけるエミッタンス

- $h\nu$: 4.67eV, 266nm
- ϕ_0 : 4.3eV
- $C_s\sqrt{E}$: 0.38eV (100MV/m)
- R : 1.0mm
- T : 300K

エミッタンス $\sim 0.35\pi \text{ mm.mrad}$

温度低下による効果はほとんどなし

(レーザーの寄与 : 0.75eV、熱運動による寄与 : 0.026 eV)

NEA GaAs 陰極によるエミッタンス

- レーザーエネルギーの寄与 : 0.025eV (測定値)
- ビーム径 : 1.0mm
- T : 77.4K (液体窒素温度)

エミッタンス : $\sim 0.09\pi \text{ mm.mrad}$

レーザーの寄与が室温の熱エネルギー $kT = 0.026\text{eV}$ と同程度ため冷却効果大きい。室温だとエミッタンス $\sim 0.13\pi \text{ mm.mrad}$ 程度。

量子効率・寿命

- NEA表面形成のための GaAs への Cs、酸素の蒸着方法、条件の最適化。量子効率 10%以上を維持する。
- イオンによる逆流被曝が寿命低下の主因。高真空 (10^{-10} Pa) の確立、維持。
- 真空悪化を抑えるために 33 MV/m 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。
- 寿命を $1.0 \times 10^6 \text{C}/\text{cm}^2$ (1mm 径の陰極面積、100mA で 25 時間) 以上を目標とする。

エミッタンス増大の抑制

- 高繰り返しによりピーク電流運転を低下させる。DC 100mA, 77pC/20ps ~ 3.9A。
- 空間電荷効果は $1/\gamma^2$ で抑制されるため、より高い DC 電場による引出し (33MV/m) とする。
- 均一な電荷分布による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%?

高圧化

- 空間電荷効果によるエミッタンス増大を抑制。
- 初期エミッタンスを小さくするために陰極面積を小さく (1mm 径) しているので銃は低パービアンスとなる。
- 所定のピーク電流 (3.9A) を得るためには高圧化が必要。

高圧化(つづき)

電子銃のパービアンズ P は極間隔 d と陰極面積 S により

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

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

ビーム電流 J はパービアンズ P と陰極-陽極間電圧 V_A により

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

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

Ti を使えば 70MV/m まで大丈夫 (古田、名古屋大)

レーザー

平均電流 $I[mA]$

$$I[mA] = \frac{\lambda_L[nm]}{124} P_L[W] \eta[\%], \quad (4)$$

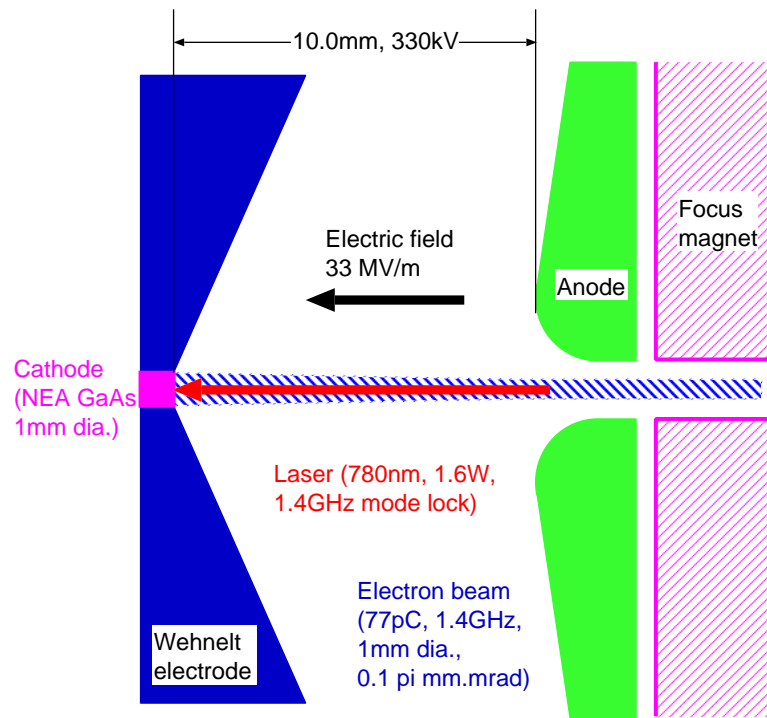
- $\lambda_L[nm]$: レーザーの波長
- $\eta[\%]$: 量子効率
- $P_L[W]$: レーザー出力

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

レーザーつづき

- より高出力レーザーにより量子効率への条件緩和、長時間運転が可能。
- パルス内の10%の照射密度の均一性; 空間電荷効果によるエミッタンス増大の抑制。
- パルス毎の出力の安定度(1%程度か)、位置の安定性($50\mu m$ 程度以下か); ビーム不安定性、ビーム損失の抑止。

ERL 電子銃の案



RF 電子銃の可能性

- RF 電子銃を用いた場合、陰極からの初期エミッタンスが大きい
ため $0.3\pi \text{ mm.mrd}$ 以下のビームを得るのは困難である。
- ただその程度のエミッタンスでいいのであれば DC 銃よりも容
易かもしれない。
- RF 電子銃ではビームはパルスとなる。連続ビームを発生するに
は超電導 RF 電子銃をつくらなければいけない。

熱電子銃の可能性

- 熱電子銃を用いた場合、エミッタンスは $0.5\pi \text{ mm.mrad}$ 以下にするのは困難である。
- 三極管構造をとるとビームを乱すので、グリッドを用いることはできない。
- 従ってでてくるビームは純粹な連続ビームであり、エミッタンス増大を抑えたうえでバンチングするのが一番難しいと思われる。
- 空間電荷効果によるエミッタンス増大の抑止に関しては PCDC 銃より容易だと思われる。(初期の電荷密度が低いため)

まとめ

- NEA GaAs 光電陰極を用いた DC 電子銃。
- 陰極を液体窒素で冷却してエミッタンス $0.09\pi \text{ mm.mrad}$ 。
- Ti:sapphire 1.3 GHz モードロックレーザー。
- 量子効率 10%、レーザー出力 1.59W で 100mA の DC ビーム発生。
- 20ps ビームを 2ps へとバンチ圧縮。
- バンチ内の電荷密度の均一度 10% 以下、バンチ毎の密度・位置の高安定性。
- 極間電圧 330kV、極間隔 1cm、表面電場 33MV/m。
- 上記電場にて暗電流 $1\text{nA}/\text{m}^2$ 以下、高真空 10^{-10} Pa 。
- 陰極寿命 $1.0 \times 10^6 \text{ C}/\text{cm}^2$ (1mm 径、100mA で 25 時間) 以上。