

3.3 入射部

3.3.1 電子銃

ERL への入射用として実現すべきビームは以下のようなものである。

- $\varepsilon_x = 0.1 \pi \text{mm.mrad}$
- 100 mA、連続ビーム
- $\sigma_z \sim 2 \text{ps}$

現在このようなビームを生成できる電子銃はこの世に存在しない。どの種類の電子銃を選択をするにせよさらなる技術開発が欠かせない。しかし ERL は加速器としてあらたな挑戦である一方、そのビームを利用して得られるであろう物質・生命科学の成果というのも一方の極として考えるべきである。すなわち確実に動作するということを可能な限り保証しなければならない。従って ERL 用の電子銃において将来の技術的飛躍を期待して開発を行うのは冒険主義のそしりをまぬがれない。そこで現状の電子銃をスケールアップして対応可能なものを候補として必要な技術開発を考察する。

電子銃は電子の発生原理、取り出し方法などによりおおまかに次のように分けることができる。

- 熱陰極 DC 電子銃。
- 熱陰極 RF 電子銃。
- 光陰極 DC 電子銃。
- 光陰極 RF 電子銃。
- 電界放出 DC(RF) 電子銃。

すなわち電子の発生方法として熱陰極を用いるもの、光陰極を用いるもの、そして電界放出を用いるもの、さらに電子の取り出し(初期加速)について静電場を用いる DC 型、高周波電場を用いる RF 型にわけることができる。

まず電子発生に熱陰極を用いる熱陰極 DC、RF 電子銃について検討する。通常の金属陰極の運転時の温度は 2700 K 程度。酸化物陰極でも 1200 K 程度である。陰極から放出された電子は熱運動によるエミッタンスを持っているが、温度を 1200 K とするとその値はビーム径を 1.0 mm 程度としても $0.32 \pi \text{mm.mrad}$ となり、我々の目標値である $0.1 \pi \text{mm.mrad}$ を既に上回っている。目標のエミッタンスを得るには陰極温度を 120 K 程度としなければならない。120 K で十分な電流を発生する熱陰極は現状で不可能であり、熱陰極を使用した電子銃は ERL には不適合である。

次に電界放出電子銃について検討する。最近カーボンナノチューブが電界放出の陰極材料として注目されている。その微細な構造ゆえに従来の電界放出型の電子銃に比べて飛躍的に低い電圧で電流を取り出せる。電子放出は点状であるためにビーム取り出しをうまく行えばエミッタンスの極めて小さいビームが得られる可能性がある。放出点をアレイ状に加工する技術などが検討されているが、電界放出型の電子銃から 100 mA という大電流を安定に取り出すことは現状では困難である。したがって電界放出電子銃は将来的に ERL 電子銃として利用される可能性はあるが見通しは明らかではない。

光陰極 RF 電子銃を ERL 用電子銃として用いる場合には次のことが問題となる。

- 初期エミッタンス、およびRF加速により生じるエミッタンスが大きい。現状ではこれらの成分だけで $1.0 \pi \text{mm.mrad}$ 程度の大きさを持つと思われ、これを ERL が要求するレベルに抑えることは原理的に困難である。
- 数 MW の RF を空洞に入力して得られる 100 MV/m 以上という極めて高い加速電場が RF 電子銃の最大の特長である。しかし連続ビームを発生させるためには熱収支から入力電力を大幅に引き下げざるをえず、したがって加速電場も大幅に低下してしまう。冷却方法などの工夫を行っても連続運転では 10 MV/m 程度が限界であると思われる。この電場は、後述する DC 電子銃で目標とする値とほぼ同じレベルであり、加速電場に関するかぎり RF 電子銃の利点はないと言える。
- 熱収支を解決する方法として超伝導空洞で RF 電子銃を構成する方法が考えられる。この銃では液体ヘリウム温度に冷却された超伝導の内壁を真空吸着材として作用し、空洞内が必然的に超高真空に保たれることから後述する NEA GaAs 陰極と組み合わせることで超低エミッタンスが得られる可能性がある。しかし陰極の装着方法など解決すべき問題がまだ多い。

以上の点から光電陰極 RF 電子銃を ERL 用電子銃として採用するのは現状では難しい。

最後の候補は光電陰極 DC 電子銃である。初期の加速に DC 電場を用いることは通常の熱電子銃と同じであるが、電子を得る方法として熱電子放出の代わりに光電効果を用いる。この光電陰極 DC 電子銃で超低エミッタンス、連続ビームを得るための技術的核は次のようなものである。

- 電子の初期横運動量を大幅に低減するため、NEA(Negative Electron Affinity) GaAs 陰極を使用する。また NEA GaAs 陰極の高い量子効率はビーム電流当たりのレーザー出力の低減に寄与する。
- 20 ps 程度の短パルスレーザー光を電子の励起に使用し、短パルス電子ビームを直接生成する。さらに 2 ps 未満にバンチ長を圧縮するためにバンチャーを使用する。
- 1.3 GHz モードロックレーザーによりパルス状の連続レーザー光を発生させる。それにより 1.3 GHz という加速高周波に同期した連続バンチビームを得る。

NEA GaAs 陰極の詳細については後述するが、ビーム径を仮に 1.0 mm とすると $0.1 \pi \text{mm.mrad}$ を下回るエミッタンスが期待される。また光電陰極型 DC 電子銃は熱電子銃や RF 電子銃にくらべて陰極に対する条件が緩やかであるという特徴がある。熱電子銃の陰極には耐熱性が要求される。そして RF 電子銃は、銃が RF 共鳴空洞であるから、真空ポートなどの設置や形状の設計などに大きな制限をうける。そのため一般的に真空度が悪く、陰極は真空度の悪い状態での使用に耐えなければならない。光電陰極型 DC 電子銃では上記のような制限は存在しない。それゆえ仮に NEA GaAs よりも性能のよい陰極材料が発明・発見された場合も、比較的容易にそれを利用することが可能となろう。

そこで本稿では NEA GaAs 陰極を ERL 電子銃の中心に据えて、この陰極に最適化した電子銃を構成することを基本方針とする。この構成の電子銃は主に偏極電子源として動作実績も充分にあり、現状の技術を発展させていくことで目標を達成することが可能であると予想される。また技術的にも柔軟でありこの挑戦的な目標を達成するための戦略として最も確実な選択であると言える。

3.3.2 NEA GaAs 光電陰極

光電陰極物質の表面状態は、物質中の伝導帯の準位と真空の準位との大小関係により正および負の電子親和度に大別される。負の電子親和度 (Negative Electron Affinity, NEA) は、伝導帯の最

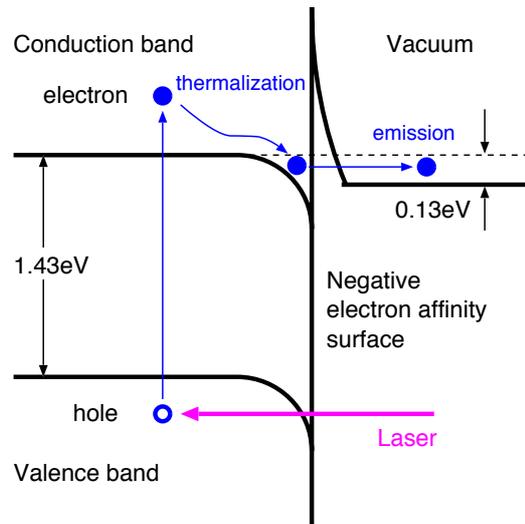


図 3.46: NEA GaAs 表面における光電効果による電子の励起と真空への放出の様子。

低準位が真空の準位よりもエネルギーが高い状態である。それに対して正の電子親和度 (Positive Electron Affinity, PEA) は伝導帯の最低準位より真空準位のほうがエネルギーが高い状態のことである。

図 3.46 は NEA GaAs 陰極の電子準位と光電効果による電子放出の様子を表している。レーザーにより伝導帯に励起された電子のほとんどは熱的にエネルギーを失い伝導帯の最低準位にたまることになる。NEA 表面では伝導帯が真空よりも準位が高いので、これらの電子は容易に真空中へと放出され、比較的高い量子効率を得られる。また、ほとんどの電子は伝導帯の底における熱平衡状態を経由してから真空中へと放出されるために、余分な運動量をほとんど持たない。したがって熱運動量の小さい極小エミッタンスビームが得られる。

他方 PEA 表面では真空準位の方がエネルギーが高いために伝導帯の底にたまった電子は真空中にすることはできず、やがて価電子帯の正孔と再結合して消滅する。ビームとしてとりだせる電子は熱平衡に落ち着く前に確率的に真空中へと放出されるものに限られ、それゆえに量子効率が低くなってしまふ。また、放出された電子はレーザー光子のエネルギーと真空準位との差に相当するエネルギーを運動量という形でもっており、乱雑な運動をしている。従って PEA 表面から得られる電子ビームの初期エミッタンスは比較的大きくなる。ほとんどの純金属、アルカリ金属は PEA 表面を有している。

光電効果により放出された電子の直交座標系における横方向エミッタンス ε_x は、

$$\varepsilon_x = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{(h\nu - \phi_0 + C_s \sqrt{E})}{3mc^2} + \frac{kT}{mc^2}} \quad (3.48)$$

で与えられる。ここで R はビーム径、 $h\nu$ は励起に使用される光子のエネルギー、 ϕ_0 は電場がない状態での陰極の仕事関数、 $C_s = \sqrt{e/4\pi\epsilon_0} = 3.79 \times 10^{-5}$ は Schottky 効果を表す係数、 E は表面

電場、 k はボルツマン定数、 T は陰極の温度、 m は電子質量、そして c は光速である。上式で第一項は電子が光子により励起された際の余分なエネルギーのエミッタンスへの寄与を表している。また第二項は陰極物質の熱エネルギーの寄与を表している。

式 (3.48) を用いて比較のため典型的な金属カソードである銅を用いた場合に得られる電子ビームのエミッタンスを求めてみる。銅の仕事関数は 4.30 eV、使用するレーザーは紫外域の 266 nm、表面電場は RF 電子銃を仮定し 100 MV/m、ビーム径を 1 mm とすると、得られるエミッタンスは $0.35 \pi \text{mm.mrad}$ 程度となる。陰極に NEA GaAs を用いた場合、電子は伝導帯における熱的緩和を経て放出されるために式 (3.48) は正確ではない。NEA GaAs から放出される電子の横方向エネルギーは S. Pastuszka [1] らによって実験的に測定されており、その値は 25 meV 程度である。この値を用いて陰極温度を 300 K、ビーム径 1.0 mm として予想されるエミッタンスを求めると $0.13 \pi \text{mm.mrad}$ となる。さらに陰極を液体窒素温度に冷却したとするとエミッタンスは $0.09 \pi \text{mm.mrad}$ まで低下することになる。いずれにせよ NEA GaAs を陰極として使用することにより我々の目標である $0.1 \pi \text{mm.mrad}$ を下回る、あるいは極めて近いエミッタンスが得られるということである。重要なことは NEA GaAs 陰極は液体窒素温度における運転も含めて SLAC 及び名古屋大学において十分な実績を有しているということである。したがって実験的にエミッタンスを確認することは重要であるが、技術開発の核心は NEA GaAs 陰極の長寿命化や高量子効率化、安定化などいかに低エミッタンスビームを破壊せずに安定して取り出すかということに集約される。

3.3.2.1 量子効率、寿命

NEA GaAs は生の GaAs 結晶の表面に Cs と酸素を吸着させたものである。非常に繊細であり、イオンによる衝撃などですぐさま破壊されてしまう。したがって長寿命を実現するにはイオン濃度を極めて低くする必要があり、陰極近傍を高真空に保つ必要がある。

寿命を低下させる要因としては暗電流とそれに伴う真空度の悪化がその原因であることがほぼ特定されている [2]。真空中の残存ガスがイオン化されると電場に誘導されて電子とちょうど逆向きの軌道をたどり陰極に衝突する。電場整形用電極などから発生した暗電流は陽極やビームパイプに衝突し、そこからガスを放出させてイオンの種をつくるのである。いずれにしろ真空悪化とそれにより発生するイオンが寿命低下の直接的原因である。

偏極電子源として長年にわたり NEA GaAs 陰極の開発・運転実績を持つ名古屋大学、SLAC の経験からある程度の寿命を維持するためには陰極近傍の真空度を 10^{-10}Pa 以下に抑えることが必要となることがわかっている。また電極からの暗電流の値を 1nA/m^2 未満とすべきことも分かっている。

一般的に暗電流の値は表面電場が増加すると急激に増加する。したがって暗電流を抑えるにはなるべく表面電場を低くするほうがいいが、主に二つの理由から加速電場をむやみに下げることができない。一つ目の理由は、電子銃から取り出せるビーム電流が陰極の表面電場に依存しているからである。ビーム電流は空間電荷制限により電圧の $3/2$ 乗に比例するため、ビーム電流とパービアンズ (比例係数、陰極面積等により決定) により必要な加速電場が決ってしまう。パービアンズを大きくとることも可能だが、そのためには陰極面積を大きく取らざるをえず、ビームエミッタンスの増大につながる。二つ目の理由は空間電荷効果によるエミッタンスの増大を防ぐためである。均一度の項でも後述するが空間電荷効果によるエミッタンス増大を抑制する上でビームの硬さ、つまりビームエネルギーは実は本質的ではない。しかし不均一な電荷分布から生じる非線形の空間電荷効果によるエミッタンス増大の大きさはビームエネルギーの二乗に反比例する。つまり加速電場が高いほどエミッタンス増大が抑制されるのである。細かい条件については高圧化の項で述べるが、我々としては 33 MV/m という表面電場での運転を目標とする。その状態で暗電流 1nA/m^2 未満、陰極近傍での真空度 10^{-10}Pa 未満を維持しなくてはならない。

NEA GaAs の量子効率として 10%程度の値が報告されている [3]。現状ではそれを安定的に長期にわたって維持することは困難であるが、酸素や Cs の吸着の条件、電子銃内の超高真空化など高量子効率・長寿命をめざして精力的に研究開発が進行中であり、我々の目標として量子効率 10%を維持しての運転を掲げたい。また寿命については CEBAF の入射器として用いられている NEA GaAs 銃で $2.0 \times 10^5 \text{ C/cm}^2$ という値が得られている。この値は放出面積を 1 mm 径として 100 mA での運転を仮定すると 5 時間程度に相当する。複数の陰極による運転などを考慮してもこの 5 倍程度の値を達成すべきである。

3.3.3 エミッタンス増大の抑制

1.3 GHz 周期で発生するバンチビームの平均電流を 100 mA とするためには、一つのバンチ当たりの電荷量は、

$$\frac{100 \times 10^{-3} [\text{C}]}{1.3 \times 10^9} = 7.7 \times 10^{-11} [\text{C}] \quad (3.49)$$

つまり 77 pC となる。パルス長を 20.0 ps とするとピーク電流は 3.9 A となる。我々の要求するエミッタンスは極めて小さいことから空間電荷効果によるエミッタンス増大が危惧される。以下、電子銃の高圧化とビームの電荷分布を均一化することにより空間電荷効果によるエミッタンス増大を抑制する方法について考察する。

3.3.3.1 高圧化

空間電荷効果による自己発散力は γ の二乗に反比例する。そのため速やかに相対論的領域まで加速してビームを硬くすることが空間電荷効果の抑制には有効である。また、ERL 電子銃は極低エミッタンスが目標であるので、陰極面積を通常の熱電子銃などとくらべると極端に小さくせざるを得ない。ビーム径を 1 mm とするとその面積は $7.9 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ となる。陰極表面からのビーム電流密度は空間電荷により制限され、その大きさは $3/2$ 乗則より陰極-陽極間電圧の $3/2$ 乗に比例する。したがって小さい陰極から大きな電流を取り出すためには高圧化が必要となる。

しかし一方で電圧をむやみに高めると電界電子放出現象などにより暗電流が増加し、真空の悪化、それによる NEA 表面の破壊などが起こり問題が多い。高圧化のためには放電限界が高く、高電圧でも暗電流の少ない材料・表面処理を開発することが必要である。

鈴木 [4] によるとステンレス鋼 (クリーン Z) を材料とし電解複合研磨による鏡面化と温超純水洗浄をほどこした表面から放出される暗電流は表面電場 34 MV/m において 12.5 pA/m^2 であったという。この値は暗電流としては極めて低い値で、真空悪化による陰極寿命の低下を相当抑制できる値である。また最近 Ti がステンレスに比べて二倍程度の耐高圧・低暗電流性能を有することが明らかとなってきている。このようにこの分野は材料・表面処理方法の研究開発が盛んに行われているので、現時点でどのような選択がベストなのかを決めるのは非常に困難である。将来の技術的發展も含めて 30 MV/m 程度での安定的・長時間運転の可能性も充分にあると思われる。

電子銃のパービアンス P は、

$$P = 2.33 \times 10^{-6} \frac{S}{d^2} (A \cdot V^{-3/2}) \quad (3.50)$$

とあらわされる。陰極-陽極間隔 d を 1 cm、陰極面積 S を $7.9 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ (ビーム径 1 mm に相当) と

すると、電子銃のパービアンスは $1.83 \times 10^{-8} (AV^{-3/2})$ となる。

電子銃から得られるビーム電流はパービアンス P と陰極-陽極間電圧 V_A により

$$J = PV_A^{3/2} \quad (3.51)$$

である。ERL 電子銃のビーム構造は 77 pC、20 ps なのでピーク電流は 3.9 A となる。上記のパービアンスを仮定すると、3.9 A の電流を得るのに必要な電圧は 330 kV となる。その時の表面電場は 33 MV/m である。したがって十分なビーム電流を得る点からも 30 MV/m を超える高い表面電場での運転を達成する必要がある。

3.3.3.2 電荷分布の均一化

空間電荷効果における自己発散力は、電荷分布が均一な場合に限りソレノイド等の収束力を外場としてかけることで打ち消すことができる。他方不均一な電荷分布がつくる非線形な自己発散力を外場によって打ち消すことは不可能である。従ってエミッタンスの空間電荷効果による増大は実質的には不均一な電荷分布により生じる非線形の自己発散力により生じる。例えばビームの進行方向に対して軸対称なガウス型にビーム電荷が分布している場合、ソレノイド収束場を最適化してもビームは時間とともに徐々にそのエミッタンスを増加させる。均一な電荷分布とは電荷密度が軸対称でかつ一定の状態、すなわちシルクハットのような分布形状のことである。空間電荷効果の抑制のためには電荷分布の均一性が非常に重要であり、そのためレーザーパワー、陰極の量子効率を陰極表面にわたって均一にすることが必要となる。しかし一方で電子発生が不均一であってもビーム自身の熱運動により分布が均一化するため、エミッタンス増大はある時点で飽和するという指摘 [5] もある。この理論によると 10% 程度の密度の不均一があってもエミッタンスの増大は 10% 以下に抑えられる。この理論の実験的確認はもちろん欠かせないが、彼ら自身が指摘している最大の理論的不定性はビームハローの取扱である。実験的にもレーザーのプロファイルがガウス分布をしている場合と均一な分布をしている状態で得られるエミッタンスに大きな違いがあることが知られている。いずれにしてもビームハローを十分に小さく抑えることが重要と思われる。

以上をまとめると、空間電荷効果によるエミッタンス増大を抑えるためにはビームハローを十分に小さく抑えた上で、中心部の均一度を 10% 程度にすることが必要である。

3.3.4 レーザー

ERL 加速器には L-band (1.3 GHz) の超伝導加速空洞が使用される。そのため、その周波数、あるいはその調和周波数に同期してビームを発生させる必要がある。ピーク電流値を抑えて平均電流値を高めるためには全ての RF バケットにビームを入れてやるのがよい。そこで 1.3 GHz モードロックレーザーを使用して連続パルスビームを発生させることとする。

光陰極から得られる平均電流 I [mA] は次のようにあらわされる。

$$I[\text{mA}] = \frac{\lambda_L[\text{nm}]}{124} P_L[\text{W}] \eta[\%] \quad (3.52)$$

ここで、 λ_L [nm] はレーザーの波長、 η [%] は量子効率、そして P_L [W] はレーザーの出力である。GaAs 陰極の仕事関数は 1.43 eV と他の光陰極に比べて小さく、UV 光を使用する必要はなく、通

常 800 nm 前後の光を使用する。そのため Ti:sapphire や多くの半導体レーザーが使用可能である。CEBAF では運転に Ti:sapphire レーザー使用しており、780 nm のレーザー光で 2.5 W 出力、1497 MHz 繰り返しという性能を達成している [6]。NEA GaAs の量子効率を 10%、レーザーの波長を 780 nm とすると、100 mA の平均電流を得るのに必要な出力は式 (3.52) から 1.59 W となる。この値は現状の技術でも不可能なものではない。しかしより高い出力のレーザーが実現されれば必要な陰極の量子効率を低く設定でき、また、より長い連続運転時間が確保できるなど利点は多い。従って可能な限りレーザーの出力を高めることには大きな意味がある。

出力だけではなくレーザーには安定性などの高い品質が要求される。空間電荷効果の抑制のための出力の均一さについては既に述べたが、パルス毎の位置変動、出力変動などについても高い安定性が要求される。ERL ではビーム間でエネルギーの受渡しをしながら、あたかも同一のビームが周回軌道をまわっているかのように運転しなければならない。ビーム電流の変動、軌道の変動は直接のビーム損失、あるいは各種のビーム不安定性を通じたビーム損失などを生じる。平均電流 100 mA は従来の 100 Hz 程度で運転するリニアックに比べて桁違いに大きい平均電流であり、「リニアックとして常識的な量のビームロス」が放射線の発生や真空容器への熱負荷など多くの問題を発生する。従って ERL への入射器には従来の線型加速器と比べて大幅に高い安定性が要求される。光陰極型の電子銃ではビーム安定性はレーザーの性能によりほぼ決まってしまう。つまりレーザーには高出力とともに極めて高い位置、出力の安定性、そして均一さが要求される。

栗木雅夫、大沢哲 (KEK・加速器)

参考文献

- [1] S. Pastuszka et al., Appl. Phys. Lett. 71 (1997) 2967.
- [2] M. Gruner and M. Tigner edited, “Study for a proposed Phase I Energy Recovery Linac synchrotron light source at Cornell university”, JLAB-ACT-01-04, 2001.
- [3] T. Nakanishi et al., NIM A 455(2000) 109-112.
- [4] 鈴木千尋, 名古屋大学大学院博士論文, 2000.
- [5] S. Lund, J. Barnard, and E. Lee, XX international linac. conference (Linac XX) proceedings, (2000) 290.
- [6] Hovater and Poelker, NIM A 418 (1998) 280.