加速器の低エミッタンス電子銃開発の動向

栗 木 雅 夫^{*1}

Recent Developments of Low-emittance Electron Gun for Accelerator

Masao KURIKI^{*1}^{*1}Graduate school of Advanced Sciences of Matter, Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama, Higashihiroshima 739-8530, Japan

(Received July 1, 2011, Accepted September 28, 2011)

Recent developments of low-emittance electron guns for accelerator are reviewed. In the accelerator field, DC biased triode thermionic gun (Pierce type gun) has been widely used and is still conventional. On the other hand, because of strong demands on the high brightness electron beam by FEL and other advanced accelerator concepts based on linear accelerator, the low emittance beam generation becomes one of the most important issue in the accelerator science. The R&D effort is “accelerated” by two technological innovations, photo-cathode and RF gun. They made a large improvement on the beam emittance. After the explanations on the technical and physical aspects of the low emittance electron beam generation, advanced electron sources for accelerators are reviewed.

1. はじめに

電子加速器はその名のとおりに電子を加速する装置で、大きく分けると入射部と主加速器部からなる。主加速器部ではほぼ例外なく高周波加速を行うので、ビームの進行方向の長さ（パンチ長と呼び、しばしば時間でこれを表現する）は加速高周波の周期に対して十分に短くなければならない。入射部の役割は高周波加速が可能な短パンチの電子ビームを供給することにある。入射部の中で、電子を発生するためのデバイスを電子銃と呼ぶ。

電子銃として熱陰極を使用した三極管構造の静電型電子銃¹⁾が長年にわたり標準的に用いられてきており、またそれは今でも事実上の標準となっている。現代の代表的な加速器と言えば、原子核・素粒子実験における衝突型加速器（CERN の LEP²⁾、KEK のトリスタン³⁾や KEKB⁴⁾など）や現在では多くの国々で稼働している放射光源（日本国内では KEK-PF⁵⁾、SPring8⁶⁾等）である。これらの加速器はいずれも蓄積リング型の加速器である。蓄積リングに入射するビームは多くの場合線形加速器で加速され、リングへと入射される。その後、リングの中を電子ビームは周回軌道をひたすらまわり続ける。また電子はシンクロトロン放射によるエネルギー損失と、それを補う RF 空洞での再加速を繰り返すので、最終的なリング中での電子ビームの位相空間分布やエネルギー広がり、パンチ長などはリングの中におけるビーム力学的な二つの競合過程、量子励起と放射減衰の均衡状態として決定される⁷⁾。結果として、リング中で実現される電子ビームの品質は入射電子ビームの性能とは全く独立に決まってしまう。したがって入射ビームの性能の向上は蓄積ビームの品質向上に全く寄与しない。三極管構造の熱電子銃が事実上の標準として長年使用されているのは、そのような技術的要請が無かったからに他ならない。決して開発研究を怠ってきたからではない。

しかし近年、線形加速器をベースとした新しいタイプの加速器が多数建設されている。FEL (Free Electron Laser)⁸⁾

はその代表である。FEL はエネルギー広がり、パンチ長、エミッタンス¹¹⁾の小さい電子ビームを線形加速器で加速し、アンジュレーターという交番磁場でコヒーレントな放射光を発生させるものである。理研播磨⁹⁾、ドイツの DESY¹⁰⁾、米国のスタンフォード線形加速器センター¹¹⁾各々で X 線領域の大型 FEL の建設が進められ、稼働を始めている。また電子ビームとレーザーによる Laser Compton 散乱による単色 X 線/ガンマ線の生成¹²⁾、RF 電子銃などのビームによる高速電子線回折¹³⁾、光カソードを用いた時間分解透過型電子顕微鏡¹⁴⁾など、小型の線形加速器でも様々な利用法が模索されている。電子銃で生成されたビームは線形加速器で加速される際に、断熱減衰とよばれる相対論的効果によりエミッタンスを減少させる。最終的に得られるビームのエミッタンスは電子銃での生成時の値を加速エネルギーでスケールしたものである。すなわち、線形加速器から得られる電子ビームの品質は入射ビームに強く依存する。線形加速器の高度利用が進めば進むほど入射ビームの品質が意識され、電子銃にも低エミッタンス化が要求されるのである。

以上のように、加速器の利用形態についての変遷を背景として、低エミッタンスビーム生成というものがにわかに注目をあびることとなっている。以下、低エミッタンスビーム生成について概説し、続いて研究開発の現状について述べる。

2. 低エミッタンスビームの生成

電子ビームは熱電子放出、電界放出、そして光電効果等により得られるが、加速器の電子発生には熱電子放出と光電効果がよく用いられる。

物質を高温に熱すると、電子が真空中に放出される現象が観測される。これを熱電子発生といい、この原理を用いた陰

¹¹⁾ 加速器ではビームの性質を示すのにエミッタンスを用いる。エミッタンスとは力学的には六次元位相空間における粒子の占める体積を表すが、ビーム力学では運動が三次元空間に各々独立であるとして、三つの二次元の位相空間での面積を用いる。慣習として、エミッタンスと言えばビームの進行方向にたいして横方向の運動方向エミッタンスを意味することが多いので、本文でもそれにならうことにした。進行方向のエミッタンスはエネルギー広がり、パンチ長として表記する。

^{*1} 広島大学先端物質科学研究科(〒739-853 広島県東広島市鏡山 1-3-1)

極を熱陰極 (Thermionic Cathode) という。代表的な物質はタングステン, BaO, LaB₆, CeB₆などである。電子ビームは電子の熱運動によるエミッタンス ε_{th} を持ち, 金属の場合, それは温度 T と rms ビーム径 σ により次式で表される。

$$\varepsilon_{th} = \sigma \sqrt{\frac{kT}{mc^2}} \quad (1)$$

ここで mc^2 は電子の静止質量エネルギーである。熱陰極からの放出電流は仕事関数と温度から決定されるが, エミッタンスは仕事関数には依存しないことがわかる。ここで例として温度を 1500 K, ビーム径を 1 mm とすると, 発生するビームのエミッタンスはおよそ $0.5 \pi \text{mm.mrad}$ となる¹²。

光電効果を利用した電子発生デバイスを光電陰極 (Photocathode) という。入射光子数と発生電子数の比を量子効率として定義して, 光電陰極の性能を表す指標として用いる。典型的な光電陰極物質としては Cu, Mg 等の金属, Cs₂Te や GaAs などの半導体を使用される。金属カソードは量子効率が 0.1–0.001% と低い, 堅牢で, かつ応答速度が早いのが特徴である。金属の光電陰極からのビームのエミッタンスは,

$$\varepsilon_m = \sigma \sqrt{\frac{\hbar\omega - \phi}{3mc^2} + \frac{kT}{mc^2}} \quad (2)$$

と与えられる¹⁵。ここでは熱による寄与を入れ込んでいる¹³。ルートの中の第一項目は光電効果に用いたレーザーの寄与, 第二項が熱エネルギーによる寄与である。大抵の場合, 第一項が支配的である。例として銅陰極を固体レーザーの四倍波である 266 nm の光で励起することを考えよう。余剰のエネルギーは $4.67 \text{ eV} - 4.30 \text{ eV} = 0.37 \text{ eV}$ であるから, この項の寄与のみによるエミッタンスは 1 mm 径を仮定して $0.49 \pi \text{mm.mrad}$ となり, 熱陰極とほぼ同等となる¹⁴。熱陰極に比べて温度が低いので, 光電陰極は原理的に極小エミッタンスが可能であるが, それにはレーザー波長の仕事関数への合わせ込みが必要であることがわかる。しかし他方でレーザー波長が仕事関数に近くなればなるほど, 光電子発生量子効率は減少していくことが知られている。

Fowler の式の二次までの項をとると, 光電子発生量子

効率の波長依存性は

$$\eta \propto \frac{\pi^2}{6} + \frac{1}{2} \left(\frac{\hbar\omega - \phi}{kT} \right)^2 \quad (3)$$

と表され¹⁶, レーザー波長の仕事関数への合わせこみにより減少することがわかる¹⁵。すなわちエミッタンスの低下と引き換えに必要なレーザーパワーが増大するのである。C. P. Hauri 等¹⁷は Cu などの金属陰極から生成されるビームを計測し, 式(2)が示すように波長を仕事関数に合わせ込むことでビームのエミッタンスが低減することを明らかにした。また仕事関数に近い波長でも有限の量子効率を維持しており, このような条件が実用に耐えうる可能性を示した。

Cs₂Te や GaAs などの半導体陰極は量子効率は一般的に 1–20% 程度と高いが, カソードの活性化から使用まで超高真空を維持する必要がある。また, 運転可能時間や引出し可能電荷量などが真空圧力に大きく影響され, 実用化の上で大きな課題となっている^{18,19},¹⁶。半導体陰極の場合は, バンド構造を有するために, 励起された電子のエネルギーが有効質量に影響される。Fig. 1 に NEA-GaAs 光電陰極からの電子放出の様子を模式的に示す。価電子帯 (Valence Band) からレーザーなどの光によって伝導帯に励起された電子は拡散により表面へと到達する。電子のエネルギーが真空準位よりも高ければ電子として放出される。EA (Electron Affinity) とは伝導帯の底と真空準位との差で, Fig. 1 において χ と示されている。NEA-GaAs ではこの EA が負の値, NEA (Negative Electron Affinity) となっていることが知られている²⁰。NEA とはすなわち真空準位が価電子帯よりも低い特殊な表面状態のことである。価電子帯と伝導帯の間にエネ

Fig. 1 Photo-emission from NEA-GaAs is schematically shown. Left part shows a band structure of a direct transition-type semiconductor. Electrons excited to the conduction band move to its surface by diffusion. Right part shows the surface potential and χ is defined as EA. If the electron energy is above the vacuum level, the electron can be emitted as the photo-electron.

¹² 加速器では運動量に代わり $x' = p_x/p_s$ (横方向運動量を進行方向の運動量で割った無次元量) を用いて, (x, x') を位相空間とする。これよりエミッタンスの単位は m.rad や mm.mrad などとなるが, 面積を求めるさいに必然的に出てくる π を単位に入れ込んで $\pi \text{mm.mrad}$ などと表されることが多い。また, この定義では加速により p_s が増大するにしたがってエミッタンスが減少するので, 異なるエネルギーのビームを比較するさいに不都合を生じる。そのため (x, x') 空間の面積にローレンツ因子の $\gamma\beta$ を掛け合わせてエネルギー依存性を打ち消す。こうして求められたエミッタンスを規格化エミッタンスと呼ぶ。本稿ですべてのエミッタンスはすべて規格化エミッタンスである。

¹³ 式(2)は, $T=0$ という条件での光電子放出における電子エネルギーと, 熱的に電子が持つエネルギーを各々求め, それらの和として得られたものである。有限温度における分布関数の直接の積分を解析的に求めるのは困難である。

¹⁴ 陰極表面に高い電場が存在すると, Schottky 効果により仕事関数が実質的に減少することが知られている。その効果を含めると, 実際の RF 電子銃中におけるエミッタンスはより大きくなる。

¹⁵ 温度 $T=0$ と仮定すると $\eta \propto (\hbar\omega - \phi)^2$ となる。これは近似式であり, 光のエネルギーが仕事関数に近い場合ずれが大きくなる。有限の温度であれば必ずフェルミ準位より上に熱的に励起された電子が存在するので, 量子効率はレーザーを仕事関数へ近づけてもゼロにならない。

¹⁶ 真空圧力にして $1\text{E}-10 \text{ Pa}$ 台を電子銃内で安定して実現することが必要だと認識されている。

ルギーバンドギャップ E_{BG} をもつ GaAs などの直接遷移型の半導体で、発生する電子のエミッタンスを求めると

$$\varepsilon_{sc} = \sigma \sqrt{\frac{2(\hbar\omega - E_{BG})}{3mc^2} \frac{\mu}{m_c} + \frac{kT}{mc^2}} \quad (4)$$

となる^{21),17}。ここで m_c は伝導帯での有効質量、 μ は光遷移の結合状態密度における換算質量²²⁾である。ここでは電子親和性 χ をゼロと置いている。この式から半導体陰極の場合でも、エミッタンスを抑制するためには光の波長を E_{BG} に合わせ込む必要があることがわかる。Pastuszka ら²³⁾は NEA-GaAs 陰極からのビームについてエミッタンスを決める横方向エネルギーを計測した。その結果、レーザー波長が E_{BG} に相当するエネルギーで、横方向のエネルギーが熱エネルギーとほぼ等しくなることが示されている。

今までビーム径は独立に決まるパラメーターとして考えてきたが、実際には取り出せる電荷量は空間電荷効果により制限される。 E をカソード面上における加速電場とすると、電荷量 Q を取り出すのに必要なビーム径は

$$\sigma = \frac{R}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Q}{\pi \varepsilon_0 E}} \quad (5)$$

である。ここで ε_0 は真空の誘電率で、径方向に均一なパンケーキ状の電荷分布を仮定しており、 R はその半径である。実際のビームの電荷分布はレーザーのプロファイル等により変化するが、電荷と電場の依存性はおよそ式(5)で表される。これより、電荷量と表面電場からおのずと必要な径が決まり、式(1)、(2)、(4)などとあわせて、原理的に可能なエミッタンスの最小値が決まる。

実際には、ビーム生成後も空間電荷効果によるエミッタンスの増大が生じる。空間電荷効果のうち、非線形な成分のみが実質的にエミッタンス増大に寄与するので、非線形空間電荷効果をいかに小さくするかがエミッタンス低減からは重要である。空間電荷効果そのものは相対論効果により $1/\gamma^2$ にスケールして減少するので、速やかに加速することが必要である。この点からも表面電場を大きくすることのメリットは大きい。また、空間電荷効果の非線形成分を小さくするには KV 分布や均一分布など電荷分布をより均一化することが効果的である。シミュレーションによると²⁴⁾、電荷分布の均一化等により、この理想的なエミッタンス値に近い値が得られることが示されている。また Bazarov らは原理的に可能なエミッタンスの定式化を試み、例として 8.2 MV/m の表面電場、1nC のパンチ電荷でおよそ 0.7 π mm.mrad という値を示している²⁵⁾。

以上から、低エミッタンス生成には次のことが重要なことがわかる。まず発生するビームの横方向エネルギー（等価温度としばしば言われる）を低減すること。これにはカソードの低温化、レーザーの仕事関数等への合わせこみが必要となる。また、表面電場を大きくすることは、ビームスポット径の矮小化と非線形空間電荷の低減を通じて、低エミッタンス

ビーム生成に効果的である。

3. 低エミッタンス電子銃の動向

RF 電子銃の典型的な表面電場は 40 MV/m から 120 MV/m 程度である。一方、DC 電子銃のそれは数 MV/m から 10 MV/m 足らずであり、RF 電子銃に比べて一桁程度低い値になっている。この点からは RF 電子銃が低エミッタンス電子発生に有利であると言える。特に大きなパンチ電荷を必要とする場合には、RF 電子銃が有利である。しかし一方で、RF 電子銃は共振構造という条件があるために設計自由度が低く、低い真空圧力を要求する NEA-GaAs 陰極等の使用は困難である¹⁸。DC 型電子銃はパンチあたりの電荷量が比較的低い場合や、偏極電子生成など NEA-GaAs 陰極が必要な場合に用いられている。また、パルス構造も電子銃を決定するうえで重要な因子である。一般的に高勾配で RF 電子銃を連続運転することは、空洞内壁で消費されるジュール損失が莫大となることから困難である。ERL (Energy Recovery Linac) など連続ビーム生成が要求される場合、連続運転が可能な DC 電子銃が用いられる。

以下、RF 電子銃、DC 電子銃という順番で研究の動向を紹介する。また、最後に唐突ではあるが、レーザー加速についての私見も述べさせていただく。レーザー加速は研究開発が盛んに行われている一方で、加速器技術としてはまだ未成熟というのが一般的な見方である。しかし、レーザー加速の特性を考えると、将来的には究極の高輝度電子源として非常に高いポテンシャルを有していると思われる。

3.1 RF 電子銃

RF 電子銃は RF 空洞内で直接電子ビームを生成し、そのまま数 MeV 程度まで加速するデバイスである。J. S. Fraser ら²⁶⁾により FEL のための電子入射器として提案された。

RF 電子銃には陰極に熱陰極を用いるタイプと光陰極を用いるタイプがある。熱陰極タイプではビームは連続的に発生するため、RF 空洞の位相に応じて広いエネルギー広がりをもつビームが出力される。そのビームの一部をアルファ型磁石などで切り出して使用する。しかしどうしてもビームの一部はカソードに逆流してカソードの温度上昇を招くために安定した運転が困難であるという欠点がある。光陰極を用いたタイプはレーザーの時間構造（パルス幅）により発生するビーム構造を制御できる。そのため熱陰極で生じるような逆流による不安定性がないのが長所である。RF 電子銃は光陰極型を中心に開発がすすめられ、現在では SLAC (Stanford Linear Accelerator Center), BNL (Brookhaven National Laboratory), UCLA で共同開発された BNL 型^{27,28)}と呼ばれるものが広く使用されている。Fig. 2 に BNL 型の RF 電子銃の電場プロファイルを断面でしめす。図の下端が中心軸に相当し、左端で発生した電子ビームは右に向かって加速される。このように BNL 型は二つのセルからなる共振

¹⁷ ここでも式(2)と同様にレーザーにより発生するエネルギーと熱エネルギーをそれぞれ別に求め、最後に和を求めている。

¹⁸ 極低真空圧力を実現することが困難なことに加えて、RF 電子銃内部では高い表面電場に起因する電界放出電子（ビームと区別して暗電流と呼ぶ）の存在が大きな障害となる。暗電流の多くは電場の逆転によりカソードに逆流衝突し、NEA カソード表面を破壊することが知られている。

Fig. 2 The half cross section of BNL type RF gun with electric field profile. The left end corresponds to the end plate. Electrons generated by the cathode placed at the center of the end plate, is accelerated to right direction.

構造をとっており、位相差 π の定在波型空洞である。共振周波数は2856 MHzのS-bandであり、光電陰極での表面電場は90 MV/mから120 MV/m程度が実現されている。SLACのX線FELであるLCLS (Linac Coherent Light Source) の入射器²⁹⁾にもBNL型のRF電子銃が使用されており、カソードには空洞の構造材である銅をそのまま使用している。Cuの量子効率率は0.01%から0.001%程度と低いが、構造が単純である点が利点である。また、比較的低い繰り返しであれば数nC程度のパンチを生成することは現在のレーザー技術からすれば容易である。BNLではCuより量子効率が一桁から二桁高いMgをカソードに用いている³⁰⁾。銅の母材にディスク状のMgを熱的にかしめて固定している。製作に手間がかかること、CuとMgの境界で放電を生じる可能性があることが欠点である。KEKではBNL型RF電子銃でマルチパンチビームを生成するため、1.0%程度の量子効率が見られるCs₂Teカソード³¹⁾を使用している。Cs₂TeカソードはCERN(欧州原子核研究所)により開発されたカソード材料で、真空中でCsとTeを蒸着させて生成する。また、生成後に大気にさらすと使用不可能となるために、カソード生成用の真空蒸着槽に加えて電子銃まで真空中を移送する機構が必要となる。そのため装置が大がかりとなるが、RF電子銃の内部で安定的に1%程度の量子効率を維持できる唯一のカソード材料である。KEKではリニアコライダのために開発された銅の超精密加工技術³²⁾を用いて電子銃空洞を加工し、従来型の加工に比べて大幅に低い80 μ A程度(2.5 μ sパルス内平均)の暗電流を実現している。カソード表面において115 MV/mという高い電場で定常的に運転されており、パンチ電荷1.6 nCで1.5 π mm.mradという低いエミッタンスを実現している³³⁾。Fig. 3に仮組途中のRF電子銃の内部を示す。加工はダイヤモンドバイトによる超精密旋盤でおこない、加工後は研磨などの処理をおこなっていないが、鏡面様の滑らかな表面が得られている。大阪大学では、電子回折実験やパルスラジオリシスなどのRF電子銃の先進的利用に焦点をしばらく研究をすすめている。使用しているのは銅カソードのBNL型で、0.6 nCのパンチ電荷で1.91 $\pm$ 0.28 π mm.mradというエミッタンスを実現している³⁴⁾。DESYはXFEL¹⁰⁾および電子陽電子リニアコライダー³⁵⁾のための超伝導加速技術の開発を目的として、

Fig. 3 Picture during the test assembly of RF Gun after the cavity machining by the super-fine lathe with diamond bite. Center hole corresponds to the iris between two cells. The cavity is not current gun at KEK-ATF, but the machining is identical.

FLASH/TTF¹⁰⁾という試験加速器を建設した。超伝導での効率的な加速を行うためには、パルスの繰り返しは低く、一つのパルスはなるべく長く、そして一つのパルスあたりになるべく多くのパンチを詰め込んで運転することが好ましい。FLASH/TTFでは最大でおよそ1 msという長大パルス加速が行われている。そのような長いマクロパルス構造を発生できる電子銃として、1300 MHzの共振周波数を持つ常伝導のRF電子銃が開発された^{36,37)}。DESY-PITZ (Photo-Injector Test facility at DESY-Zeuthen)においてFLASH/TTF-RF電子銃の運転試験が行われ、45 MV/mというデザイン値に近い42 MV/mというピーク加速電場を実現している。また1.0 nCのパンチ電荷量で、1.5-2.0 π mm.mradというエミッタンスを生成している³⁸⁾。

RF電子銃は高い加速勾配を実現できるが、長いパルス生成や連続ビーム生成にはジュール熱の発生が問題となる。一定のRFパワー P を投入したときに発生する加速電場 E はシャントインピーダンス R を用いて

$$E = \sqrt{PR} \quad (6)$$

と表される。長大パルス運転におけるFigure of meritとして加速電場を空洞壁の単位面積当たりの消費電力で規格化したもの

$$FoM = \frac{E}{P/S} \quad (7)$$

が考えられる。 S は空洞内壁の面積である。シャントインピーダンスは高周波の周波数に対して $\sqrt{\omega}$ の依存性を持っている。他方、空洞内壁の面積は $1/\omega^2$ の依存性であるので、これらを代入すると

$$FoM \sim \frac{1}{E\omega^{1.5}} \quad (8)$$

となり、より周波数が低いほうが望ましいことがわかる。

BNL型RF電子銃は短パルス（数 μ 秒程度）で、2856 MHzという高い周波数で100 MV/mと高い加速勾配を実現しているのに対して、Boeingによる433 MHzのRF電子銃はduty factor 25%という連続運転に近い状態で32 mA（パルス内平均だと132 mA）という大電流を発生させた実績を有している³⁹⁾。FLASH/TTFの1300 MHz電子銃はその中間に位置すると言っていいだろう。しかし常伝導RF電子銃で連続運転を目指す研究開発は、その後活発に行われているとは言えない⁹⁾。

空洞壁での電力損失を抑えるということを考えると、すぐに思いつくのは超伝導でRF電子銃をつくることである。超伝導RF電子銃の研究は1988年というかなり早い段階から試みられてきた⁴¹⁾。超伝導空洞を加速器に本格的に導入したのはKEKのTRISTAN加速器³⁾であるが、その後超伝導加速技術は急速に進歩を見せ、現在では大型の超伝導線形加速器（DESYのXFEL/FLASH¹⁰⁾はその代表）が建設されている。このように超伝導加速技術自体は大きく進展している一方で、超伝導RF電子銃の開発には長い間進展が見られなかった。超伝導加速と比較して、超伝導RF電子銃が抱える課題は大きくわけて二つある。二つとも光陰極を空洞内に配置するという点に由来しており、超伝導RF電子銃固有の技術的課題である。一つめの課題は、光陰極は超伝導物質ではないため、大量の熱が発生することである。この熱が原因となり、クエンチを引き起こして超伝導状態が破れてしまうのである。この問題の解決のために、チョーク構造が考案され、陰極と超伝導空洞を直接接触させず、熱伝導を低く抑えるという技術が開発された。二つめは、光電陰極という「異物」を空洞内に持ち込むことで、空洞内が汚染され、電界放出などにより超伝導空洞内壁そのものの発熱が増えてしまう問題である。これらの困難は抱えつつも、Forshun-gszentrum Dresden Rossendorfのグループは2002年に世界で初めて超伝導RF電子銃によるビーム生成に成功した⁴²⁾。この電子銃は光陰極のマウント部にチョーク構造を導入し、Cs₂Teカソードで平均電流18 μ A、パンチ電荷80 pCで 3 ± 1 π mm.mradというエミッタンスを実現している。この成功に触発され、現在では複数の研究機関が超伝導RF電子銃の開発研究に取り組んでいる⁴³⁾。

3.2 DC電子銃

DC電子銃は連続運転が可能で、設計自由度が高いこと、などが長所である。他方、加速勾配がRF電子銃に比べて劣るため、低エミッタンスビーム生成には、パンチ電荷を低く抑える、ピークカレントを抑制する、などの工夫が必要である。

設計自由度の高さは、DC型電子銃でのNEA-GaAs陰極の使用を可能にする。西谷ら⁴⁴⁾はGaAs陰極に量子井戸による超格子構造をつくることで伝導帯にミニバンドを形成し、物質側の構造を利用した低エミッタンス化を提案した。この物質を陰極に用いることで、原理的に発生するビームのエネ

Fig. 4 Beam emittance from NEA-GaAs photo-cathode as a function of residual energy of photo-excitation, i.e. laser photon energy minus E_{BG} . Emittance of Super-lattice cathode is much suppressed comparing to that of Bulk-GaAs. Reprinted with permission from N. Yamamoto et al., Journal of Applied Physics, 102, 024904, (2007)⁴⁵⁾. Copyright 2011, American Institute of Physics.

ルギー広がりがこのミニバンド幅以下に抑制されることとなるため、極めて小さいエミッタンスのビームを発生できることが期待された。続いて山本ら⁴⁵⁾は、ミニバンド幅が35 meVの超格子カソードからのビームエミッタンスを計測し、エミッタンスが1 mm ビーム径で0.16–0.18 π .mm.mradという値を計測し、超格子カソードによる優位性を実証した。

Fig. 4にその結果を示す。横軸はレーザーとバンドギャップエネルギー E_{BG} との差である。この計測においては超格子構造のない通常のp型GaAs（Bulk-GaAs）陰極と超格子GaAs陰極とを比較し、レーザーの波長に対するエミッタンスの依存性も計測している。Fig. 4で示されている通り、Bulk-GaAs陰極からのエミッタンスがエネルギーとともに増大するのにたいして、超格子GaAs陰極はエミッタンス増大が大幅に抑制されていることがわかる。超格子GaAs陰極では式(4)から予想されるようなエミッタンス増大は見られず、超格子構造による閉じ込め効果を実証されたといえる。

各地で計画されているERL（Energy Recovery Linac）の電子銃は低パンチ電荷、高繰返しで、大電流の低エミッタンスビーム実現を目指すものである。ERLでは電子銃から連続して100 mA程度の大電流電子ビームを生成する。このビームを入射加速器でまず10 MeV程度まで加速し、さらに主加速器で目的となるエネルギー（数GeV程度）まで加速する。この加速されたビームをアンジュレーターなどの発光用の電磁石を通過させ、放射光を発生させる。このビームは加速されたばかりのフレッシュなビームであるから、量子励起の影響などを大幅に抑制できるため、入射電子ビームの性能を極めて高くできれば、究極の高輝度光源が実現される。5 GeVクラスのERL加速器を考えると、電子銃で0.1 π mm.mrad程度のエミッタンスを実現できれば、1 Åの波長において回折限界光が実現可能である。発光に使用されたビームはもう一度主加速器に送り込まれるが、この時ビームは減速位相に乗せられる。ビームは主加速器の出口では入射エネルギーと等しい10 MeV程度まで減速され、それから

¹⁹⁾ LANL（Los Alamos National Laboratory）やLBNL（Lawrence Berkeley National Laboratory）などで開発が行われている。興味のある方は参考文献⁴⁰⁾等を参照していただきたい。

Fig. 5 3D graphical view of CERL (Compact ERL) as demonstrator. Left down part corresponds to the electron gun. The generated electron beam is accelerated by the injector cavity and boosted up to 200 MeV by the main linac. The electron beam is injected to the main linac again, but on the deceleration phase.

ビームダンプに送られる。減速するときに失われたエネルギーは空洞内の電磁場として蓄えられ、次のビーム加速に使用される。実際には空洞内に同時に加速ビームと減速ビームが同居して、電磁場を媒介して減速ビームから加速ビームへとエネルギーが移動していることになる。このエネルギー回収機構により毎回フレッシュな電子ビームを使用するという贅沢な加速器が可能となる。

このように ERL では量子励起が大幅に抑制されるため、FEL と並ぶ究極の放射光源として注目されている。ERL は米国ジェファーソン研究所 (JLAB)/Cornell 大学⁴⁶⁾、英国 Daresbury 研究所、日本の KEK/JAEA⁴⁷⁾ 等が数 GeV クラスの計画を進めている。**Fig. 5** に KEK/JAEA が中心となりすすめている ERL 実証機の模式図を示す。図の左下が電子銃である。

ERL はこのように魅力的な放射光源である一方、電子銃に対する要求は従来型の加速器に比して極めて厳しい。第三代放射光源では電子ビームは周回軌道をまわり続けるため、立ち上げ時などを除けば、残留ガスとの散乱などの原因で減少していくビーム電流を補うだけでよかった。一方、ERL では電子銃で発生させるビーム電流と発光に使用されるビーム電流は等しいので、電子銃で 100 mA クラスの電流を実現させなければならない。また ERL としての性能を発揮するには、ビームは回折限界である $0.1 \pi \text{mm.mrad}$ にせまる低エミッタンスであることが要求される。すでに説明したように低エミッタンスと大電流はトレードオフの関係にあり、簡単には実現しないが、その候補がすでに何回か触れた NEA-GaAs 光電陰極である。多くの ERL 計画が NEA-GaAs 光電陰極を使用した DC 型の電子銃を開発目標に掲げている。JLAB は 500 kV の DC 電子銃を目標としており、現在までに 320 kV、電場にして 3.9 MV/m を実現している。135 pC までのバンチ電荷を 37 MHz 程度の繰り返しで発生しており、ビーム電流は 5 mA 程度である。スポット径は 6 mm で、エミッタンス $15 \pi \text{mm.mrad}$ が得られている⁴⁸⁾。JAEA では DC250 kV 電子銃により、0.15 mm という極小スポットから $1 \mu\text{A-CW}$ ビームを生成し、 $0.13 \pi \text{mm.mrad}$

Fig. 6 Dark current through field emission process from various materials are shown as a function of surface field. Ti and Mo have good performance comparing to Cu and SUS from the high field electrode point of view. Reprinted with permission from ref.⁵⁰⁾. Copyright 2011, Elsevier B. V.

Fig. 7 Schematic view of 500 kV electron gun developed by a group led by JAEA and KEK. It demonstrates a stable operation at 500 kV in 2010.

という極小エミッタンスを実現している⁴⁹⁾。

DC 型電子銃で低エミッタンスかつ大電流のビームを生成するためには、高い表面電場と加速電圧を実現することが必要である。DC 電子銃の高電圧化の障壁となるのは最終的には絶縁破壊などの破壊的な放電現象であるが、その前段階としての電界放出による電極からの暗電流を低減する必要がある。暗電流は NEA-GaAs 陰極のもう一つの課題である寿命問題とも関連しており、ERL の実現にとってその低減は重要な項目である。古田ら⁵⁰⁾は清浄な金属表面からの暗電流を調べ、Mo と Ti が暗電流低減に有利であるとの結論を得た。**Fig. 6** にその結果をしめす。KEK と JAEA を中心とするグループはこの知見を活かし、ERL 実証機⁴⁷⁾のための 500 kV 電子銃開発をすすめ、2010 年には 500 kV の安定印可に世界で初めて成功した⁵¹⁾。**Fig. 7** にその電子銃の模式図を示す。この電子銃には電極材料の知見に加えて、放電時のダ

メージがセラミックの特定部分に集中することを防ぐための分割電極構造, 内導体から発生した暗電流由来の電子が直接セラミックに当たらないように遮蔽するためのガードリング, などの工夫が凝らされている. この電圧では7.7 pC程度のバンチ電荷で0.1 π mm.mradという超低エミッタンスビームが期待され, 現在はビーム試験に向けて準備が進められている.

DC電子銃の高電圧化と低エミッタンス電子ビーム生成に独自の切り口から取り組んで成功しているのが理研播磨のXFELの入射器⁵²⁾である. この電子銃は電圧をパルスで印可し通常は困難な500 kVという加速電圧を作り出している. カソードにはCeB₆熱カソードを使用し, およそ3 μ sという長いバンチとして生成し, 圧縮してから加速を行うという, 伝統的な入射器の構成をとっている. ピーク電流を抑制することで空間電荷効果によるエミッタンス増大を抑制するというアイデアである. 測定されたエミッタンスは1 Aのピーク電流で1.1 π mm.mradである⁵²⁾. 理研播磨XFELの試験加速器であるSCSSにおいて, FELのSASE発振が観測されたのはご存じの通りである⁵³⁾. この低エミッタンスビームを壊すことなく, 加速できていることのなよりの証である.

3.3 レーザー加速

レーザー加速はレーザーがプラズマ中に引き起こす航跡場(Wakefield)により, 通常のRF加速器に比べて極めて高いGV/m以上の加速場を生じさせ, プラズマ中の電子を加速する. 田島とDawson⁵⁴⁾により1979年に提案され, 2000年代に入り擬単色ビーム加速に成功する例が多く報告されている⁵⁵⁻⁵⁷⁾. レーザー加速では短パルスレーザーを微小スポットに収束させ, 加速を行う. これは見方を変えればプラズマを陰極とした, 特殊なレーザー場による光電効果と考えられる. 電子ビームによる低エミッタンスの実現には, 低い温度, 微小なスポット径, そして高い加速電場が必要であるが, このうちレーザープラズマ加速は微小スポット径と高い加速電場という条件を満たしている. それも従来の電子銃に比して桁違いの値である. このことから筆者はレーザー加速は究極の高輝度電子源としての可能性を秘めていると考えている. 現在のレーザー加速の課題は安定性(再現性)と繰り返し加速の実現であるが, このうち安定性さえ実現できればレーザー加速は高輝度電子源として, 世間で考えられているよりも早く実用化されうるのではないかと筆者は期待している.

4. ま と め

加速器における低エミッタンス電子銃の最近の動向についてまとめた. 電子銃において低エミッタンス化が意識されるようになったのはそんなに昔のことではない. そこで前半において低エミッタンスビーム生成のために考慮すべき事項を, 自らの頭の整理も兼ねてまとめた. 後半ではRF電子銃とDC電子銃に分けて最近の動向をレビューした. 短パルス型のRF電子銃は技術的にほぼ完成しつつあり, 中心課題はこの特性を活かした利用に移っているようだ. それに対して連続運転を含む長パルス型のRF電子銃は安定した運転のた

めの課題が多いように思う. また超伝導RF電子銃はまだ研究開発の黎明期であり, 今後の発展が期待される. DC型電子銃はJLABの電子銃に代表されるように, 100 kVクラスでは安定した運転が実現されており, 低いバンチ電荷では極低エミッタンスも実現されている. 課題はバンチ電荷の高い高輝度運転でエミッタンス増大を抑制する高電圧での運転の実現である. CornellとJAEA/KEKグループで500 kV運転を目指した競争が続いているが, 筆者も共同研究者の一人であるJAEA/KEKグループが500 kVの安定印可を実現したことは大きな成果である. また理研播磨XFEL/SCSSが独自のアプローチでSASE発振を実現したことは特筆に値する.

最後にレーザー加速への高輝度電子源としての可能性への期待も含めて, 筆者なりの考えを述べてみた.

以上のようにさまざまな研究を紹介したが, もちろんすべての研究を網羅しているわけではない. しかし研究の動向を把握するうえで不可欠なものは含めたつもりである. 加速器における電子銃は本体から比べると小さな存在であるが, 加速器全体の性能を左右するといっても過言ではない. 本稿が加速器における電子銃の重要性を再考するきっかけとなり, なんらかの研究の発展に寄与できれば幸いである.

〔文 献〕

- 1) J. Pierce: J. Appl. Phys., **10** (1939) 548.
- 2) LEP design report, CERN-LEP-84-01 (1984).
- 3) TRISTAN design report, KEK (1977).
- 4) KEKB design report, KEK report95-7 (1995).
- 5) <http://pfwww.kek.jp>
- 6) JAERI-RIKEN Spring8 project team, Conceptual Design Report (1991).
- 7) H. Wiedemann: *Particle Accelerator Physics I* (Springer, 1993).
- 8) L. R. Elias, W. M. Fairbank, J. M. J. Madey, H. A. Schwettman and T. I. Smith: Phys. Rev. Lett., **36** (1976) 717.
- 9) T. Shintake, H. Tanaka, T. Hara, T. Tanaka, K. Togawa, M. Yabashi, Y. Otake, Y. Asano, T. Fukui, T. Hasegawa, A. Higashiya, N. Hosoda, T. Inagaki, S. Inoue, Y. Kim, M. Kitamura, N. Kumagai, H. Maesaka, S. Matsui, M. Nagasono, T. Ohshima, T. Sakurai, K. Tamasaku, Y. Tanaka, T. Tanikawa, T. Togashi, S. Wu, H. Kitamura, T. Ishikawa, T. Asaka, T. Bizen, S. Goto, T. Hirono, M. Ishii, H. Kimura, T. Kobayashi, T. Masuda, T. Matsushita, X. Maréchal, H. Ohashi, T. Ohata, K. Shirasawa, T. Takagi, S. Takahashi, M. Takeuchi, R. Tanaka, A. Yamashita, K. Yanagida and C. Zhang: Phys. Rev. ST Accel. Beams, **12** (2009) 070701.
- 10) Conceptual Design Report, TESLA-FEL 95-03, DESY (1995).
- 11) LCLS conceptual design report, SLAC-R-593 (2002).
- 12) J. Urakawa: Nucl. Instr. & Meth. A, **637** (2011) S47.
- 13) S. Schaefer, W. Liang, A. Zewail: Chem. Phys. Lett., **493** (2010) 11.
- 14) N. D. Browning, G. H. Campbell, J. E. Evans, T. B. LaGrange and B. W. Reed: ChemPhysChem, **11** (2010) 781.
- 15) D. Dowell and J. Schmerge: Phys. Rev. ST Accel. Beam, **12** (2009) 074201.
- 16) C. Crowell, T. Kao, C. Anderson and V. Rideout: Surf. Sci., **32** (1972) 591.
- 17) C. P. Hauri, R. Ganter, F. Primpe, A. Trisorio, C. Ruchert and H. Braun: Phys. Rev. Lett., **104** (2010) 234802.
- 18) J. Grames, R. Suleiman, P. A. Adderley, J. Clark, J. Hansknecht, D. Machie, M. Poelker and M. L. Stutzman: Phys. Rev. ST Accel. & Beams, **14** (2011) 043501.
- 19) M. Kuriki, C. Shonaka, H. Iijima, D. Kubo, H. Okamoto, H.

- Higaki, K. Ito, M. Yamamoto, T. Konomi, S. Okumi, M. Kuwahara and T. Nakanishi: Nucl. Instr. & Meth. A, **637** (2011) S87.
- 20) D.T. Pierce and F. Meier: Phys. Rev. B, **13** (1976) 5484.
- 21) M. Kuriki: Lecture material, (Hiroshima Univ., 2010).
- 22) P. Yu and M. Cardona: *Fundamentals of Semiconductors*, (Springer, 2005).
- 23) S. Pastuszka, D. Kratzmann, D. Schwalm, A. Wolf and A. S. Terekhov: Appl. Phys. Lett., **71** (1997) 2967.
- 24) J. Limborg: *Proc. of FEL Conf.*, (2005) 416.
- 25) I. Vazarov, B. Dunham and C. Sinclair: Phys. Rev. Lett., **102** (2009) 104801.
- 26) J. Fraser and R. Sheffield: Nucl. Instr. & Meth. A, **250** (1986) 71.
- 27) D. T. Palmer, X. J. Wang, R. H. Miller, M. Babzien, I. Ben-Zvi, C. Pellegrini, J. Sheehan, J. Skaritka, H. Winick, M. Woodle and V. Yakimenko: *Proc. of 1997 Particle Accel. Conf.*, (1998) 2687.
- 28) X. J. Wang and I. Ben-Zvi: *Proc. of 1997 Particle Accel. Conf.*, (1998) 2793.
- 29) P. R. Bolton, J. E. Clendenin, D. H. Dowell, M. Ferrario, A. S. Fisher, S. M. Gierman, R. E. Kirby, P. Krejcik, C. G. Limborg, G. A. Mulhollan, D. Nguyen, D. T. Palmer, J. B. Rosenzweig, J. F. Schmerge, L. Serafini and X.-J. Wang: Nucl. Instr. & Meth. A, **483** (2002) 296.
- 30) X. J. Wang, M. Babzien, R. Malone and Z. Wu: *Proc. of Linac2002*, (2002) 143.
- 31) P. Michelato: Nucl. Instr. & Meth. A, **393** (1997) 455.
- 32) T. Higo: *Proc. of Linac2010*, (2010) FR104.
- 33) N. Terunuma, A. Murata, M. Fukuda, K. Hirano, Y. Kamiya, T. Kii, M. Kuriki, R. Kuroda, H. Ohgaki, K. Sakaue, M. Takano, T. Takatomi, J. Urakawa, M. Washio, Y. Yamazaki and J. Yang: Nucl. Instr. & Meth. A, **613** (2010) 1.
- 34) J. Yang, F. Sakai, Y. Okada, M. Yoroze, T. Yanagida and A. Endo: Nucl. Instr. & Meth. A, **491** (2002) 15.
- 35) TESLA Technical Design Report (2000).
- 36) J. Baehr, I. Bohnet, J.-P. Carneiro, K. Floettmann, J. H. Han, M. v. Hartrott, M. Krasilnikov, O. Krebs, D. Lipka, F. Marhauser, V. Miltchev, A. Oppelt, B. Petrossyan, S. Schreiber and F. Stephan: TESLA Note 2003-33 (2003).
- 37) B. Dwersteg, K. Floettmann, J. Sekutowicz and Ch. Stolzenburg: Nucl. Instr. & Meth. A, **393** (1997) 93.
- 38) K. Abrahamyan, J. Bähr, J. P. Carneiro, K. Flöttmann, J. H. Han, M. v. Hartrott, M. Krasilnikov, D. Lipka, V. Miltchev, A. Oppelt, B. Petrossyan, D. Pose, D. Richter, S. Schreiber, L. Staykov and F. Stephan: Nucl. Instr. & Meth. A, **558** (2006) 249.
- 39) D. H. Dowell, S. Z. Bethel and K. D. Friddell: Nucl. Instr. & Meth. A, **356** (1995) 167.
- 40) S. S. Kurennoy, D. L. Schrage, R. L. Wood, L. M. Young, T. Schultheiss, V. Christina and J. Rathke: Nucl. Instr. & Meth. A, **528** (2004) 392.
- 41) H. Chaloupka, H. Heinrichs, A. Michalke, H. Piel, C. K. Sinclair, F. Ebeling, T. Weiland, U. Klein and H. P. Vogel: Nucl. Instr. & Meth. A, **285** (1989) 327.
- 42) D. Janssen, H. Büttig, P. Evtushenko, M. Freitag, F. Gabriel, B. Hartmann, U. Lehnert, P. Michel, K. Möller, T. Quast, B. Reppe, A. Schamlott, Ch. Schneider, R. Schurig, J. Teichert, S. Konstantinov, S. Kruchkov, A. Kudryavtsev, O. Myskin, V. Petrov, A. Tribendis, V. Volkov, W. Sandner, I. Will, A. Matheisen, W. Moeller, M. Pekeler, P. v. Stein and Ch. Haberstroh: Nucl. Instr. & Meth. A, **507** (2003) 314.
- 43) A. Arnold and J. Teichert: Phys. Rev. ST Accel. Beams, **14** (2011) 024801.
- 44) T. Nishitani, T. Nakanishi, M. Yamamoto, S. Okumi, F. Furuta, M. Miyamoto, M. Kuwahara, N. Yamamoto, K. Naniwa, O. Watanabe, Y. Takeda, H. Kobayakawa, Y. Takashima, H. Horinaka, T. Matsuyama, K. Togawa, T. Saka, M. Tawada, T. Omori, Y. Kurihara, M. Yoshioka, K. Kato and T. Baba: J. Appl. Phys., **97** (2005) 094907.
- 45) N. Yamamoto, M. Yamamoto, M. Kuwahara, R. Sakai, T. Morino, K. Tamagaki, A. Mano, A. Utsu, S. Okumi, T. Nakanishi, M. Kuriki, C. Bo, T. Ujihara and Y. Takeda: J. Appl. Phys., **102** (2007) 024904.
- 46) G. H. Hoffstaetter, B. Barstow, I. V. Bazarov, S. Belomestnykh, D. Bilderback, S. Gruner, M. Liepe, H. Padamsee, D. Sagan, V. Shemelin, C. Sinclair, R. Talman, M. Tigner, V. Veshcherevich, G. A. Krafft and L. Merminga: *Proc. of 2003 Particle Accel. Conf.*, (2003) 192.
- 47) R. Hajima, N. Nakamura, S. Sakanaka and Y. Kobayashi: Design study of the compact ERL, KEK-Report 2007-7 (2007).
- 48) T. Siggins, C. Sinclair, C. Bohn, D. Bullard, D. Douglas, A. Grippo, J. Gubeli, G. A. Krafft and B. Yunn: Nucl. Instr. & Meth. A, **475** (2001) 549.
- 49) R. Nagai, R. Hajima, N. Nishimori, T. Muto, M. Yamamoto, Y. Honda, T. Miyajima, M. Kuriki, H. Iijima, M. Kuwahara, S. Okumi and T. Nakanishi: *Proc. of IPAC10*, (2010) 2341.
- 50) F. Furuta, T. Nakanishi, S. Okumi, T. Gotou, M. Yamamoto, M. Miyamoto, M. Kuwahara, N. Yamamoto, K. Naniwa, K. Yasui, H. Matsumoto, M. Yoshioka and K. Togawa: Nucl. Instr. & Meth. A, **538** (2005) 33.
- 51) R. Nagai, R. Hajima, N. Nishimori, T. Muto, M. Yamamoto, Y. Honda, T. Miyajima, H. Iijima, M. Kuriki, M. Kuwahara, S. Okumi and T. Nakanishi: Rev. Sci. Instr., **81** (2010) 033304.
- 52) K. Togawa, T. Shintake, T. Inagaki, K. Onoe, T. Tanaka, H. Baba and H. Matsumoto: Phys. Rev. ST Accel. Beams, **10** (2007) 020703.
- 53) T. Tanaka, H. Tanaka, K. Togawa, T. Hara, M. Yabashi, T. Fukui, A. Higashiya, N. Hosoda, T. Inagaki, S. Inoue, M. Kitamura, H. Maesaka, M. Nagasono, T. Ohshima, Y. Otake, T. Sakurai, K. Shirasawa, T. Asaka, T. Hasegawa, H. Ohashi, S. Takahashi, S. Tanaka, T. Tanikawa, H. Kitamura, T. Ishikawa and T. Shintake: *Proc. of FEL08*, (2008) 537.
- 54) T. Tajima and J. Dawson: Phys. Rev. Lett., **43** (1979) 267.
- 55) S. P. D. Mangles, C. D. Murphy, Z. Najmudin, A. G. R. Thomas, J. L. Collier, A. E. Dangor, E. J. Divall, P. S. Foster, J. G. Gallacher, C. J. Hooker, D. A. Jaroszynski, A. J. Langley, W. B. Mori, P. A. Norreys, F. S. Tsung, R. Viskup, B. R. Walton and K. Krushelnick: Nature, **431** (2004) 535.
- 56) J. Faure, Y. Glinec, A. Pukhov, S. Kiselev, S. Gordienko, E. Lefebvre, J.-P. Rousseau, F. Burgy and V. Malka: Nature, **431** (2004) 541.
- 57) C. G. R. Geddes, Cs. Toth, J. van Tilborg, E. Esarey, C. B. Schroeder, D. Bruhwiler, C. Nieter, J. Cary and W. P. Leemans: Nature, **431** (2004) 538.