

軟X線自由電子レーザーに用いる熱カソード型高電圧パルス電子銃の開発

渡川 和晃^{1, A)}、新竹 積^{B)}、松本 浩^{B)}、北村 英男^{A)}

A) 理化学研究所・播磨研究所

〒679-5148 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1

B) 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

1. はじめに

SPring-8 地区において、Water Window 領域（軟X線：2.3 - 4.4 nm）の自己増幅型自由電子レーザー（SASE-FEL）を小規模施設で実現することを目指した SCSS 計画（SCSS は SPring-8 Compact SASE Source の略記）が本年度よりスタートした。

SASE-FEL 用の電子ビームにはその特性として、

- 1) 低いエミッタンス
- 2) 高いピーク電流

が要求されるのであるが、「1 GeV 程度の Compact な装置で」となると、従来よりも一桁小さいエミッタンスの電子ビームを生成できる電子銃が必要不可欠であり、現在その開発が最重要課題となっている。我々は、将来、X 線領域の自由電子レーザーを実現することもターゲットに置いて、表 1 に示すパラメーターの電子ビームをアンジュレーター部で達成することを目標に電子銃の開発を始めた。

SASE-FEL のゲインを稼ぐには長さ 20 m のアンジ

ュレーター中の電子ビームを 10 μm 以内の光軸に合わせ込む必要があるため、高精度で確実な Beam Based Alignment (BBA) を行うことになる。このために、電子銃には次の性能が要求される。

- 1) ハローがない様なビームが生成できること
- 2) 長期安定性と再現性があること
- 3) メンテナンスとチューニングが容易であること

我々はこれらのことを踏まえて新しいタイプの電子銃の設計を行った。図 1、2 にシステムのデザインチャートと電子銃の概念図をそれぞれ示す。次節においてこれらの説明を行う。

Beam Energy	1 GeV
Normalized Emittance (RMS)	0.5 - 2 πmm-mrad
Peak Current	2 - 4 kA
Bunch Charge	0.5 - 1 nC/bunch

表 1 : SCSS 計画のビームパラメーター (アンジュレーター部)

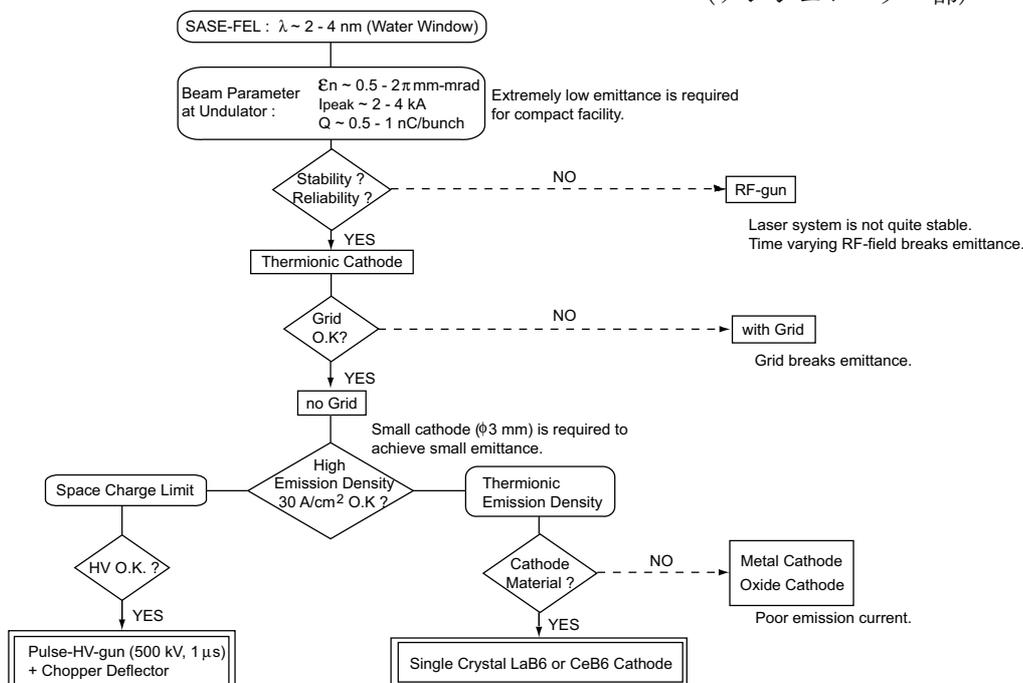


図 1 : SCSS 用電子銃のシステムデザインチャート

¹ E-mail: togawa@spring8.or.jp

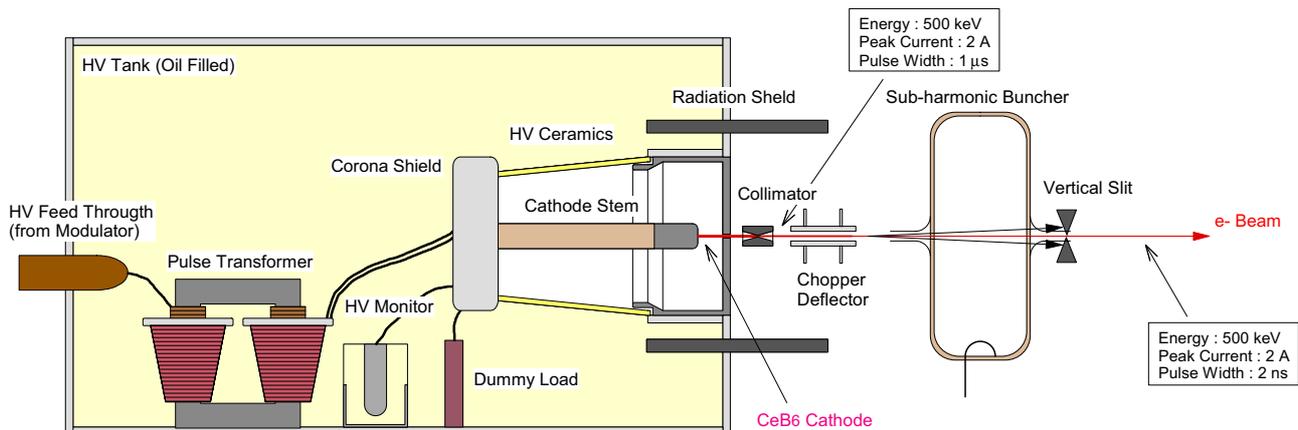


図 2 : SCSS 用電子銃の概念図

2. 電子銃パラメーターの選択

諸外国における数々の SASE-FEL プロジェクトでは、低エミッタンスを生成する電子銃として RF 電子銃の開発が行われている。しかし、我々は別の選択肢として、これまでに信頼性が十分に実証されている熱電子銃をベースにした設計を行うことにした。その理由は以下の通りである。まず、レーザーが安定性に欠けること。フォトカソードに照射するレーザー光の位置と密度分布が安定しないと、同じ場所に同じ強度の電子ビームが得られないことになるから BBA が出来なくなり、SASE どころではなくなってしまふ。また、フォトカソードについても、表面状態に unknown な部分が多くて一様な量子効率を得ることが難しいなど、再現性に乏しい。

一般に、熱電子源からバンチビームを形成するためにコントロールグリッドが使われる。しかし、グリッドによる電場の歪がエミッタンスを悪化してしまうので、我々はこれを使用しないことにした。

次に、熱カソードのサイズを決定する。熱カソードのエミッタンス (RMS) は次の式で表わされる。

$$\mathcal{E}_{n,RMS} = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{kT}{mc^2}} \quad (r: \text{カソード半径})$$

エミッタンスがカソード径に比例するので、小面積のカソードからビームを引き出す必要がある。カソードの動作温度がおおよそ 1500°C であることから、エミッタンスの要求値を満足するカソード半径は 1.5 mm 程度になる。

電子銃に要求されるパルスビームのピーク電流値が 2 A であるので、電流密度 30 A/cm² が得られるカソード物質を選択しなくてはならない。熱電子の放出電流密度は Richardson-Dushman の式

$$j_{th} = AT^2 \exp(-\phi/kT) \quad (\phi: \text{仕事関数})$$

で表わされる (定数 A は理想的な表面で 120 となり、単結晶カソードではこれに近い値が得られると考えられる)。電流密度が仕事関数の増加に対して指数関数的に減少するので、金属カソードのように仕事

関数が高い (~4.5 eV) 物質では十分な電流密度を得ることができない。また、酸化物系カソードも引き出せる電流密度に限界があって、カソードの面積を大きくせざるを得なくなり低エミッタンスビームが生成できない。高密度ビームが得られる物質としては六ホウ化ランタン系カソード (LaB₆, CeB₆) が存在する。電子顕微鏡用のカソードとして広く使用されていることから信頼性が高いと考え、これを採用することにした。次節で詳細を述べる。

最後に考慮しなければならないのが電子銃の空間電荷制限電流密度である。これは Child- Langmuir の式、

$$j_{sc} = 2.33 \times 10^{-6} \frac{V^{3/2}}{d^2} \quad (\text{A/cm}^2)$$

(V: 印加電圧 (V), d: 加速ギャップ (cm))

で表わされる。30 A/cm² の電子ビームを引き出すには 500 kV の高電圧を 5 cm のギャップ間に印加しなければならない。500 kV のパルス電圧 (パルス幅 1 μs) の印加は既に X-band クライストロンの電子銃において試みられており、達成可能な範囲であると判断した。高電圧でビームを引き出すため、空間電荷によるエミッタンス増大の効果を小さくすることも期待される。

バンチの形成 (ピーク電流 2 A、バンチ幅は 2 ns) は、引き出したパルスビームを電子銃出口に設けたチョッパーディフレクターと後方の縦方向のスリットによって切り出す手法を用いる。さらに、サブハーモニックバンチャーとビームコリメーターにより圧縮と整形を行った後、リニアックへ入射する。

3. CeB₆ カソード

1990 年代に KEK の小林らはペッパーポット方式による低エミッタンスの測定技術を確立して、カソード表面とエミッタンスの関係についての系統的研究を行った。この研究によって、単結晶の LaB₆ が優れた特性を持ち、高密度の低エミッタンスビーム (ピーク電流 0.5 A (密度 57 A/cm²))、規格化エミッタ

ス ~ 1 π mm-mrad (95%)) を生成できることが実証されている^[1]。

最近、新しい熱カソード物質として六ホウ化セリウム (CeB_6) が登場し、電子顕微鏡などで使用され始めた。 CeB_6 は仕事関数が 2.4 eV と小さいことから動作温度を低く設定できるため、カソード物質の蒸発量を少なく抑えることができるもののほか、カーボン系の汚染に対して強いこと、大気開放後のエミッション電流の回復が早いこと、など LaB_6 よりも優れた特性を持つ。 CeB_6 カソードを製造販売している FEI 社 (USA) によると、Scanning Auger System のカソードにおいて 10,000 時間の寿命が達成されたとのことである。表 2 に様々なカソード物質のパラメータの比較を示す。

カソードの長期安定性の観点から、 CeB_6 が SCSS 用電子銃のカソードに適していると考え、我々はこれを採用することにした。

	CeB_6	LaB_6	Tungsten
Brightness (A/cm^2 -sr)	10^7	10^7	10^6
Work Function (eV)	2.4	2.6	4.5
Evaporation Rate (g/cm^2 -sec) at 1800 K	2.1×10^{-9}	2.9×10^{-9}	NA
Sort-term Beam Current	<1	<1	<1
Stability (% , RMS)			
Typical Service Life (hr)	1,500+	1000	100
Operating Vacuum (torr)	10^{-7}	10^{-7}	10^{-5}

表 2 : カソード性能の比較 (FEI 社カタログより^[2])

4. カソード・アッセンブリーの設計

図 3 に開発中のカソードアッセンブリーの断面図を示す。これは次に挙げる特徴を持つ。

1) CeB_6 単結晶を Pyrolytic Graphite 製のヒーターブロックで挟み込む、Vogel 型と呼ばれるマウント方式を採用^[3]。Pyrolytic Graphite は c 軸方向で $\sim 0.2 \Omega$ cm の高い抵抗率を持つので、10A 程度の通電によって CeB_6 を加熱できると考えられる。また、 CeB_6 を円筒型のグラファイトヒーターで囲い、輻射熱で加熱する傍熱型のアッセンブリーの設計も行っている。

2) 空間電荷効果を和らげるようにビームを発散しながら引き出すことを考えているため、ウェネルトアノードの形状を単純な平行平板とした。

3) ウェネルトとアノードの材料に高純度モリブデンを使用する。モリブデンは融点が高く硬い金属であることから優れた高電圧特性を持ち、熱負荷の大きい高電圧部品に古くから応用されてきた。現在、高電圧試験の準備中である。

5. まとめ

SCSS 計画に用いる熱カソード型パルス高電圧電子銃の設計を行った。今後、 CeB_6 カソードの性能試験、電子銃パルスタンクの設計を行う予定である。

参考文献

- [1] H. Kobayashi, et al., "Emittance Measurement for High-Brightness Electron Guns", Proceedings of the 1992 Linear Accelerator Conference, Ottawa, Canada, Aug. 23-28, 1992
- [2] URL:<http://www.feibeamtech.com/>
- [3] S. F. Vogel, Rev. Sci. Instrum. 41 (1970) 585

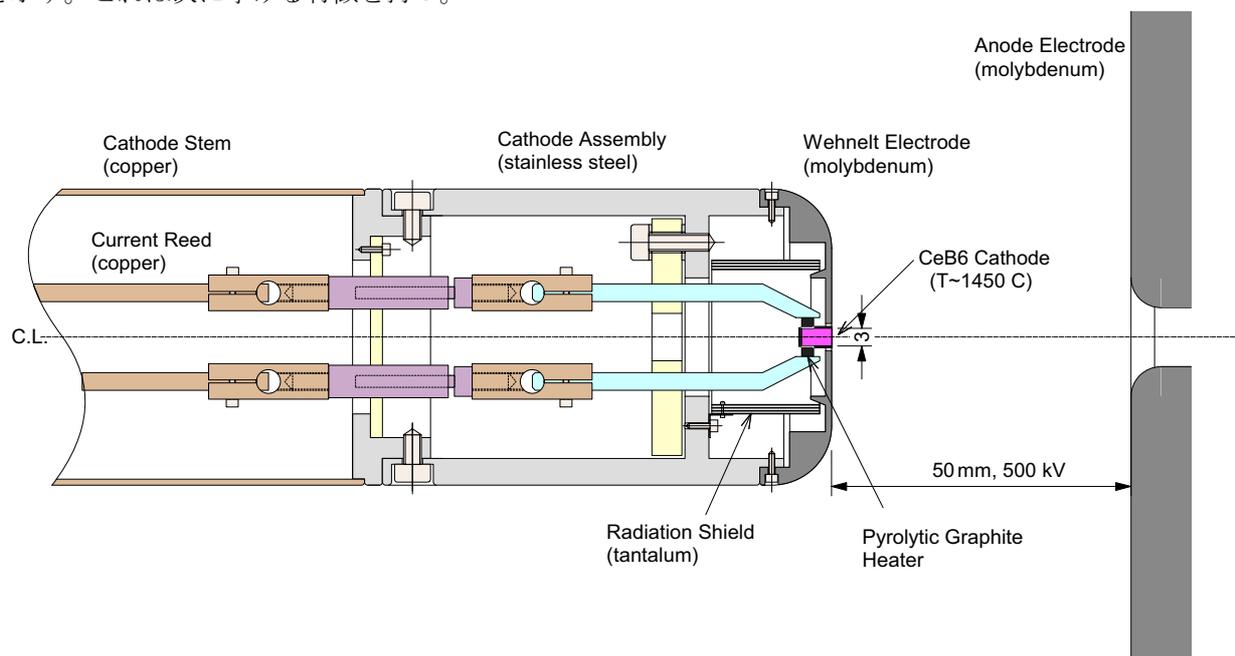


図 3 : SCSS 用電子銃カソードアッセンブリーの断面図