

ペッパーポットを用いたNEA-GaAs電子源のエミッタンス測定

山本尚人^{1,A)}、山本将博^{A)}、中西彊^{A)}、栗木雅夫^{B)}、奥見正治^{A)}、古田史生^{A)}、西谷智博^{A)}、
宮本延春^{A)}、桑原真人^{A)}、浪花健一^{A)}、吉岡正和^{B)}、浦川順治^{B)}

A) 名古屋大学大学院理学研究科 物理学教室
〒464-8602 愛知県名古屋市千種区不老町

B) 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設
〒305-0801 茨城県つくば市大徳1-1

概要

次世代の電子線加速器計画では低エミッタンス化が焦点となっており、特にERL計画では、電子源において $0.5 \pi \text{ mm mrad}$ 未満という超低エミッタンスビームが求められている。この実現にむけて、我々はNEA-GaAsフォトカソードと直流型高電界電子銃の組み合わせによる大平均電流・低エミッタンス型電子源の開発を計画している。空間電荷効果によるエミッタンス劣化を無視し得る動作条件下では、NEA表面フォトカソードが初期エミッタンスの点で有利だからである。現在、計画の第一歩として名古屋大学で製作中のNEA-GaAsフォトカソード型200keV偏極電子源のエミッタンスをペッパーポット法により測定する計画を進めておりその準備状況を報告する。

1. はじめに

近年、高エネルギー物理実験や放射光源などの加速器において電子ビームの低エミッタンス化が求められている。特に究極の短波長・干渉性の高い放射光生成を目指すエネルギー回収型ライナック (ERL) では、電子銃出口において $0.5 \pi \text{ mm mrad}$ 以下という超低エミッタンスの電子ビームが必要とされ、カソードから低エミッタンスビームを取り出しその後の空間電荷効果によるエミッタンス劣化を最小限に抑えつつ光速まで加速することが必要となってくる。

我々はこの手段として、NEA-GaAsフォトカソードと直流型高電界電子銃の組み合わせに注目している。これは負の電子親和性を持たせたGaAsのNEA表面から電子を取り出すフォトカソードであり、真空準位が伝導帯の底よりも低いという性質のため高い量子効率(10%以上)と低い初期エミッタンスが期待できる。これに高電界をかけ急速に加速することによりエミッタンス劣化を最小限に抑えることが可能である。

この方式により初期エミッタンス ($0.1 \pi \text{ mm mrad}$) が実現できると予測されているが、この方式の有効性を実証する第一歩として、リニアコライダー用に現在開発中であるNEA-GaAsフォトカソード型200keV偏極電子銃 [1] のエミッタンスをペッパーポット法で測定する計画を立てた。

NEA表面カソードはもともと偏極電子源に必須のものとして研究されてきたものであり、以下のようなステップを経て偏極電子ビームを生成している。(1)バンドギャップエネルギーに相当する波長の円偏光レーザーを照射して価電子帯の電子スピンを選択して伝導帯に偏極電子を生成する。(2)この電子を半導体表面にNEA表面を形成することによって真空中に取り出す。実際のNEA表面は、(a)半導体表面にp型不純物をドーピングすることにより表面のバンドを下向きに曲げ、さらに(b)超高真空中で清浄化したGaAs結晶表面にCsと O_2 を交互に添加して、Ga(+)-Cs(-)の電気的二重層を形成することで得られる。このNEA状態は真空の状態に非常に敏感でありその寿命を維持するためには、 10^{-10} Pa 程の超高真空を保つとともにイオンバックボンバーメントを抑えることが必要である。

以下において、まずは初期エミッタンス最小化にNEA-GaAsが有効であることを説明し、次に現在開発中であるペッパーポット型エミッタンス測定装置について述べる。

2. 初期エミッタンス

これまでの加速器用電子源に求められるエミッタンス値は比較的大きなものであったため、初期エミッタンスの優劣はそれほど重要視されることはなかった。しかし近年ERL計画に見られるように初期エミッタンスが議論され始めた。初期エミッタンスは陰極から放出される電子が持つ横向き運動量(エネルギー)により生じるものである。この電子が持つ横向きエネルギーは、フォトカソードの場合熱エネルギーとレーザーが与えた励起エネルギーの2つが考えられる。レーザーにより電子を励起させる場合、電子に与えるエネルギーはその物質表面が持つ真空準位以上でなければならない。さらに、電子は励起された直後からフォノンとの散乱によってエネルギーを失ってしまうため、真空準位よりかなり大きなエネルギーを与えることが実用に耐える量子効率を稼ぐために必要となる。この時の余分なエネルギーが初期エミッタンスを劣化させる原因となると考えられる。

これに対し、NEA-GaAsは真空準位が伝導帯の底よりもわずかだが低いため、バンドギャップエネル

¹ E-mail: naoto@spin.phys.nagoya-u.ac.jp

ギョーギョーのレーザーを照射することによっても高い量子効率が実現でき、さらに低い初期エミッタンスを実現することが可能となる。電子の励起エネルギーと真空準位との差をもたらす初期エミッタンスの値は幾つかのモデルを仮定して計算されており[2][3]、NEA-GaAsに対しては $0.1\pi\text{ mm mrad}$ 以下の値が見積もられている。

3. エミッタンス測定

NEA-GaAsの初期エミッタンスを直接測定するには特殊な方法が必要である[4]。そこで本実験では電子源直後のビームエミッタンスを測定することにする。この場合でもエミッタンス測定位置はできるだけカソードに近づけるとともに、エミッタンス測定時の脱ガスによる真空度の悪化がカソードのNEA表面を破壊することがないように配慮する必要がある。

そこで我々はエミッタンス測定法としてペッパーポット法を選んだ。これは、ペッパーポットと呼ばれる小さい穴の空いた薄い金属板でビームを切り出し、その下流におけるビームサイズの広がりをシンチレーターなどでとらえ、エミッタンスを測定する装置であり、 $1\pi\text{ mm mrad}$ 以下のエミッタンスを正確に測定できることが確認されている[5]。さらにこの方法はビームの広がりを瞬時に像として捉えられるため、ビームの切り出しによる真空度の悪化を最低限に抑えることができると予想されている。

4. 実験装置

現在開発中である装置の概略図を図1に示す。この装置は排気チャンバーとペッパーポット(PP)チャンバーそして光学系の三つで構成されている。

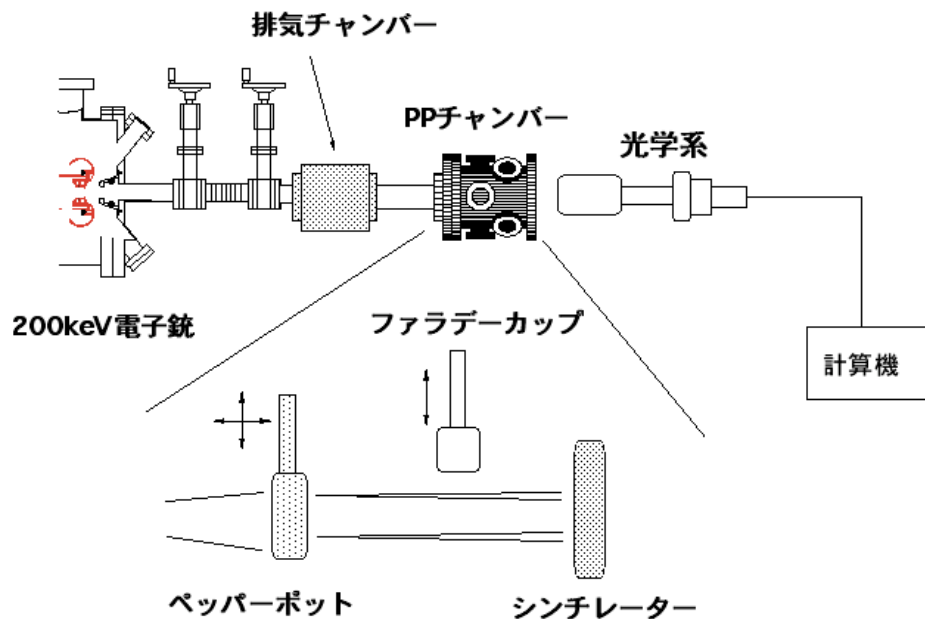
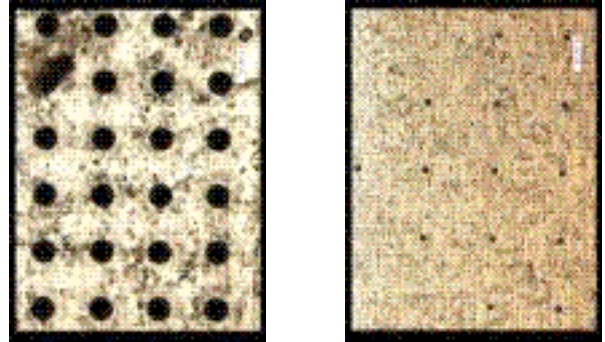


図1：エミッタンス測定装置の概要



(a)

(b)

図2：レーザー顕微鏡で捉えたペッパーポットの写真

(a)ピンホールの直径 $20\mu\text{m}$ ・間隔 $50\mu\text{m}$ 、(b)ピンホールの直径 $30\mu\text{m}$ ・間隔 $300\mu\text{m}$ でそれぞれ規則的に配置してある。

4.1 PPチャンバー

PPチャンバーには上流に可動式のペッパーポット・ファラデーカップ、最下流にプラスチックシンチレーターが取り付けられている。

ペッパーポットはビームを正確に切り出す必要があるためピンホールのサイズと間隔が正確でなければならない。ピンホールのサイズとシンチレーターまでの距離により測定可能なエミッタンスの範囲が決まってくるため、ビームに合わせてペッパーポットをデザインする必要がある。今回使用するペッパーポットを図2に示す。これは、高い融点をもつTiをその材質に使い直径 $20\mu\text{m}$ のピンホールが $50\mu\text{m}$ 間隔で直径 $30\mu\text{m}$ のピンホールが $300\mu\text{m}$ 間隔で空いてい

る。これを併用することでビームサイズにもよるが 1π 弱～ 10π mm mrad のエミッタンスが測定できる。また、Ti板の厚さは $20\mu\text{m}$ でエネルギー 150keV の電子ビームを完全に遮蔽することはできない。しかしビームは十分に散乱を受けるためシンチレーター面ではバックグラウンドとして扱える。

シンチレーターは、像のにじみを防ぐため短い崩壊時間を持ちできるだけ厚さの薄いものが必要となる。さらにNEA-GaAsを保護するためチャンバーを超高真空にする必要があり、そのためのベーキング温度に耐える融点が必要である。今回は、最初の理由からプラスチックシンチレーターを選んだ。現在用意しているシンチレーターは厚さ $10\mu\text{m}$ ・ピーク波長 375nm ・崩壊時間 1.6ns (BicronのBC-422) のものである。しかし、このシンチレーターは融点が 70°C に満たず、2つ目の条件は満たしていない。そこで、装置をまずシンチレーターをインストールしていない状態でベーキングし超高真空まで引いておき、その後一度チャンバーを大気開放した清浄な状態でシンチレーターをインストールし、ぎりぎりの 60°C で再ベーキングする予定である。また、シンチレーター表面でのチャージアップを防ぐため事前に薄いAlの膜を蒸着してからインストールを行う。

シンチレーターとして今後は同じくBicronのBC-448mの使用を検討している。このシンチレーターはピーク波長 425nm ・崩壊時間 2.1ns であり、 150°C でも使えるというものであり、比較的高温でベーキングできるため、よりよい真空状態を作ることができると予想される。

4.2 光学系

この実験でシンチレーター上での発光は小さく、さらに細かい広がりや正確に捉えなければならない。そのため光学系にも高い精度が必要とされる。シンチレーターにおける発光の測定手順は次のようである。まず、長距離顕微鏡(Questar, QM1)で像を拡大する。次にイメージインテンシファイア(浜松ホトニクス, C4078)で像を増強しCCDカメラで捉える。そして、その像を計算機に取り込み解析する。この過程ではシンチレーター上において $10\mu\text{m}$ 以上の精度でスポットサイズを捉えることができる。

4.3 中間排気チャンバー

電子銃部分は装備されている真空ポンプの排気量

は高く 10^{-10}Pa 台の超高真空に達しているのに対し、PPチャンバーはプラスチックシンチレーター自身のチャンバー内への蒸発及びエミッタンス測定中の脱ガスなどにより電子銃部分に対し1桁以上真空度が悪くなることが予想される。この対策として中間排気チャンバーを設ける。中間排気チャンバーには、 75L/s の排気量を持つイオンポンプを2台、 240L/s の排気量をもつNEGポンプを1台装着しており下流から逆流してくるガスが電子銃部分に達するのを防ぐ構造になっている。

5. まとめと今後の方針

200keV電子銃におけるNEA-GaAsのエミッタンスを測定する予定である。この測定においてまずクリアすべき課題は、超高真空の実現によるNEA表面の寿命維持の問題であると考えている。

現在測定準備に向けて以下の予備実験を予定している。

- (a) シンチレーターをインストールしての超高真空試験
- (b) ペッパーポットの電子銃に最適なデザインの検討

またこれらの問題が解決でき次第、NEA-GaAsを用いた電子源の初期エミッタンスに関して様々な条件で測定を行い、低エミッタンスビーム生成に必要な最適化条件を探る研究を行う予定である。

参考文献

- [1] M. Yamamoto et al. Linac 2002 proceedings T. Nakanishi, Linac 2002 proceedings, Gyonju, Korea, Aug. 2002
K.Wada, et al., PESP2002Proceedings, MIT, Sept., 2002
- [2] K.Flottmann, "NOTE ON THE THERMAL EMITTANCE OF ELECTRONS EMITTED BY CESIUM TELLURIDE PHOTOCATHODES.", DESY-TESLA-FEL-97-01, Feb 1997. 7pp.
- [3] 栗木雅夫. "電子源", OHO'02 高エネルギー加速器セミナー講義用テキスト
- [4] S.Pastuzka et al., J of Applied Phys. 88(2000) 6788
- [5] Y.Yamazaki, et al., "High-precision pepper-pot technique for a low-emittance electron beam", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A322(1992) 139-145 North-Holland.