

Development of the emittance measurement system of a high intensity pulsed electron beam from NEA-GaAs type photocathode

Masahiro Yamamoto^{1,A)}, Naoto Yamamoto^{B)}, Taro Konomi^{A)}, Yasuhide Nakagawa^{A)}, Hikaru Saito^{A)}, Shoji Okumi^{A)}, Tsutomu Nakanishi^{A)}, Masatoshi Tanioku^{B)}, Xiuguang Jin^{B)}, Toru Ujihara^{B)}, Yoshikazu Takeda^{B)}, Masao Kuriki^{C)}, Chie Shonaka^{C)}, Daisuke Kubo^{C)}, Hiroyuki Okamoto^{C)}

^{A)} Graduate School of Science, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-8602

^{B)} Graduated School of Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-8603

^{C)} Graduate School of Advanced Sciences of Matter, Hiroshima University,
1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8530

Abstract

The generation of low emittance beam of 10mA or more in the average current and normalized emittance of $0.5 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ or less is indispensable to ERL electron source. A high gradient DC-gun that uses the NEA-GaAs type photocathode is the prime candidate of the ERL gun. We have developed a 200keV DC-gun designed for ILC electron source and reconstructed the emittance measurement system using pepper-pot method. In this report, the optical system that can cut out some trains of mode-lock laser pulses for generating high bunch charge of more than 7.7pC/bunch and suppressing average current of less than $1 \mu\text{A}$ from the GaAs photocathode are described.

NEA-GaAs型フォトカソードより生成した高密度パルス電子ビームのエミッタンス測定系の構築

1. はじめに

次世代放射光源ERL計画では、規格化エミッタンス $0.5 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 以下かつ平均電流10mA以上 ($>7.7 \text{ pC/bunch}$) の電子ビーム生成が電子源に求められている。これを実現できる電子源としてNEA-GaAsをフォトカソードとした直流高電界型の電子源が有力候補とされている^[1]。

我々はこれまでにリニアコライダー(ILC)用スピン偏極電子源として、GaAs型超格子半導体フォトカソードおよび200kV直流高電界電子銃の開発をこれまで行ってきた^[2]。ILCとERL電子源では、それぞれに要求されている電子ビーム仕様は異なるものの、偏極電子および低エミッタンスビームの生成にはNEA表面が共に不可欠であり、これを高電界中で維持しつつビームを発生させる点で共通している。そこで、まず原理実証のため我々は200keV電子銃に装着されたNEA状態のGaAs-GaAsP超格子フォトカソードより生成した数nAの微弱電子ビームについて、ペッパーポット方式を用いた初期エミッタンスの測定を行い、 $\sim 0.1 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ を確かめた^[3]。

次の目標は、ERL要求値の電荷量7.7pC/bunch以上の電子ビームを生成し、空間電荷効果が支配的な領域でのエミッタンス測定を行う事である。

2. エミッタンス測定装置

エミッタンス測定にペッパーポット方式を採用している^[4,5]。この方式では、多数のピンホールの開いた金属薄膜に電子ビームを当て、ピンホールを通過した電子ビームが下流の蛍光スクリーンに映し出され、各像より電子ビームの位置と拡がりをもとにエミッタンスを見積もる。

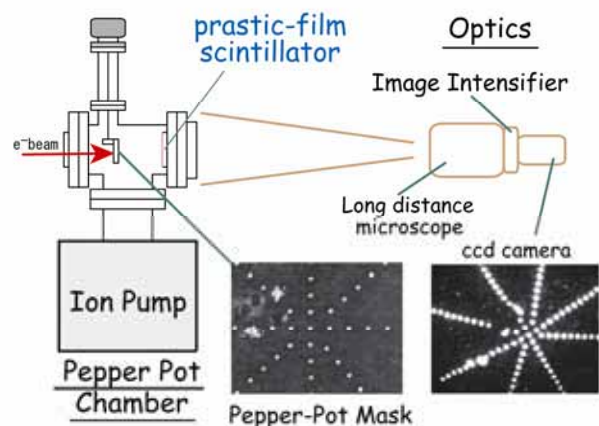


図1：Pepper-Pot法によるエミッタンス測定装置

蛍光スクリーンには、蛍光像がにじまないようにするために厚さ $10 \mu\text{m}$ のシンチレーターフィルムを

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

使用している。この薄膜シンチレーターで発光した微弱な光は、拡大望遠鏡により像が拡大された後、イメージンテンシファイア (I.I.) で増幅された像をCCDで取込んでいる。

この方式の最大の利点は、数秒以内で取得できる蛍光スクリーンの画像よりエミッタンス解析が可能のため、必要となるビーム照射量・時間が抑えられ、真空環境に非常に敏感なNEA表面に対するアウトガスの影響や測定中の量子効率低下の影響を少なくできる点にある。

フォトカソードで決まる初期エミッタンスの測定では、測定の条件として空間電荷効果の無視できる直流の微弱ビームであることが必要であった事からこの場合、特に測定に支障はなかったが、もともと導電性の小さいシンチレーターをさらに薄い状態で使用しているため、ビーム照射量の増加により容易にチャージアップ・放電を引き起こし、目的の蛍光像が得られない、さらにはシンチレーター薄膜損傷の問題が発生する。この影響を抑えるため、ビームの平均電流はおよそ数百nA程度のレベルまで抑える必要があることが初期エミッタンス測定時に明らかとなった。

そのため、今回の目的である7.7pC/bunch以上の電子ビームのエミッタンス測定では、平均電流を抑えながらバンチあたりの電荷量を確保するための工夫が必要となる。そこで、レーザーパルスのエネルギーを維持した状態で、パルス列を適度に切出してduty比を低く抑えることで、数～数十pC/bunchの電荷量領域でのエミッタンス測定を可能とする準備を行った。

3. レーザー制御系

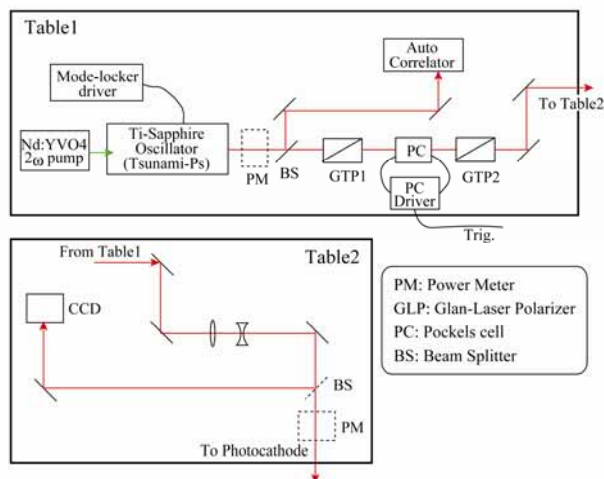


図2：ピコ秒ビーム生成試験の光学系

ピコ秒ビーム生成のための励起光源として、固体レーザー励起のTi:Sapphireモードロックレーザー (Tsunami-Ps) を使用した。レーザー発振の繰返し周波数はLバンド1.3GHzの1/16にあたる81.25MHzとなるように共振器長 (固定) が調整されている。レーザーオシレーター直後にビームスプリッタを設

置し、一部をオートコリレーター (FR-103XL: femtochrome製)へ入射させモードロック状態を常時モニターしている。

パルス列の切出しには、2連結されたBBO結晶を用いたポッケルスセル (PBC06C-DC04/800: Inrad製) を使用する。高電圧電源 (Model 2-021: Inrad製) より位相差1/2波長を生じる電圧をパルス印加し、その間の偏光面を垂直から水平方向に変化させ、その直後の偏光子により水平方向のみ通過させることで切出しを行う。ポッケルス駆動のための専用高電圧電源は、立上り・立下り約30ns、切出し最小幅は約2.5μsであり、駆動のトリガー信号は、周波数およびパルス幅可変の発振器より生成した。

切り出されたレーザー光は電子銃正面に配置された別の光学台へミラー反射により5m程度の距離を移送される。フォトカソード上のビームサイズの測定は、真空槽へ入射する手前の位置にビームスプリッタを配置し、そこからフォトカソードまでの等距離の位置にてCCD素子を用いて行った。

4. これまでの準備経過

今回の試験に用いたレーザーのパルス幅は、オートコリレーターを用いた測定結果から28.4psであった。

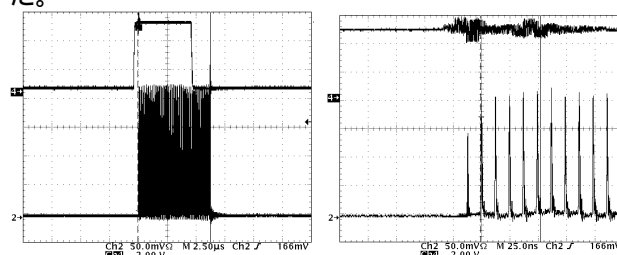


図3：ポッケルスセルによるパルス列の切出し (左図は全体 (2.5μs/dvi), 右図は切出し開始部 (25ns/dvi))

ポッケルスセルの高さ、roll,pitch,yaw角は最も良い消光比が得られるように調整し、約1:1500の消光比が得られた。本実験で採用した波長807nmにおいて結晶印加電圧3.91kVにてtotal 1/2波長分の位相差が生じる。トリガーパルスとしてパルス幅5μs、20Hzを入力し、6.3μs幅のパルス列を切出した (図)。この場合、1度の切出しで約510pulse列切出される。立上り及び立下り時に中途半端に切出されるパルスは両者合わせて5パルス程度であるため、その影響は高々1%程度である。duty比は 1.26×10^{-4} であり、Ti:Sapphireレーザー繰返し周波数81.25MHzを考慮するとERL-100mA条件となる77pC/bunchを電子源で発生させた場合でも平均電流は約790nAまで抑えられると見積もられる。1秒間に数画像取得できれば十分であるため、繰返しを抑えれば切出しパルスで発生する平均電流値を100nA程度にまで抑える事も可能である。

しかし、ポッケルスセルによる切出し時間以外の間もその消光比で決まるバックグラウンド光が常にフォトカソードに照射されている状態であり、特に量子効率が高くかつ切出し前のレーザー出力が高い場合に問題となり、本実験の場合ではレーザー出力約500mW時にバックグラウンド光のみの励起で1 μ A程度の電子ビームが引出された。これは、現在のPepper-Pot装置では測定が困難となる領域であるため、今後さらに機械的なチョッパー等と組み合わせる等の対処を行い、バックグラウンド光を現在の1/100程度に抑える必要がある。

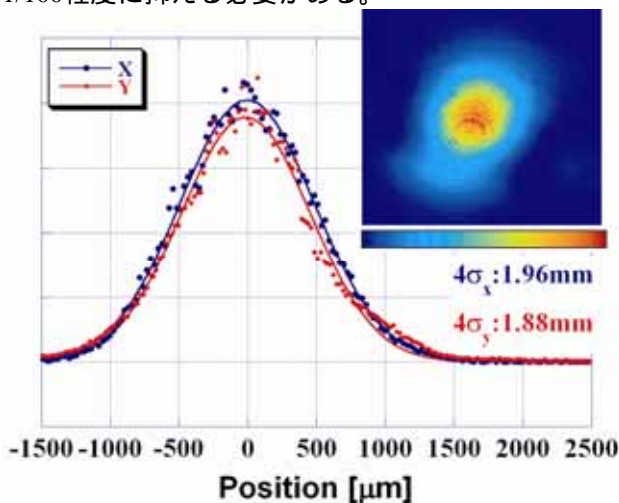


図4：CCDによるlaser spot size測定の結果

本試験で電子銃へ入射したレーザーについて、CCDによるフォトカソード面でのスポット径の測定では、直径(4 σ)でX軸1.96mm,Y軸1.88mmであった(図4)。

切出したレーザーは、200keV電子銃部に挿入されたBulk-GaAsフォトカソードへ照射される。この時の真空度は、電子銃2.6 $\times 10^{-9}$ Pa,ビーム移送系2.1 $\times 10^{-9}$ Paであった。

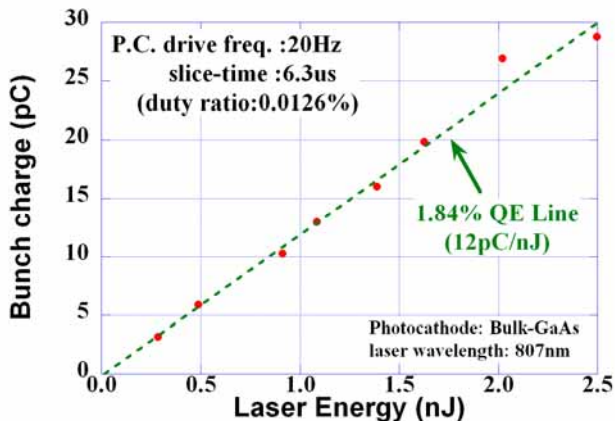


図5：切出したパルス列による電子ビーム生成の結果

ビームの引出し試験では、ポッケルスセル無駆動

時のバックグラウンド光により発生したビーム電流値、切出したレーザーパルス列を照射した時の電流値の差から、切出されたパルス列のみによって発生した正味の電流量を見積った。その結果、レーザーエネルギー2.5nJ/pulse時におよそ30pCの電子ビームが生成され、1.84%のQEラインに直線的にのる事から、空間電荷およびNEA表面電荷制限なく電子ビーム引出せていると言える。

この結果についてこの200keV電子銃のシミュレーションと比較した場合、ビーム放出径1mm、パンチ幅25psの条件において、およそ40pC以上より空間電荷効果による引出し制限の影響を受け始めるのに対し、本実験ではレーザースポット径がおよそ2mmと大きく、フォトカソードとしてBulk-GaAsを使用しているため引出されるパンチは30ps程度のレーザー幅に比べ長くテイルを引いている事^[6]、さらに使用したBulk-GaAsはZnドープ密度が3.2 $\times 10^{19}$ cm⁻³であり表面電荷制限に対しても十分耐性がある事から、得られた実験結果と特に矛盾はないと考えられる。

5. まとめと今後の課題

200keV電子銃に装着されたBulk-GaAsフォトカソードへ ~ 2 mm、28.4ps幅、2.5nJのピコ秒レーザーパルス照射し、ERL電子銃に要求されている7.7pC/bunch (10mA,1.3GHz)を超える約30pC/bunchの電子ビームを引出した。ただし、エミッタンス測定時のチャージアップ問題を避けるためには、現在の切出し幅以外のバックグラウンド光を1/100以下に抑える必要がある。

今後はフォトカソードをBulk-GaAsから超格子へ交換を行い、照射したレーザーと同等の幅をもつ電子ビームを生成する。そして、切出したビームとI.I.を同期させ、高密度パンチが入射した際のシンチレータ像を取得する7.7pC/bunch以上の領域でのエミッタンス測定を行う予定である。

6. 謝辞

本研究は高エネルギー加速器研究機構の共同開発研究「低エミッタンス(偏極)電子源の開発」の支援により行われました。

参考文献

- [1] R.Hajima., KEK Report 2007-7/JAEA-Research 2008-032 p.1-16
- [2] T.Nakanishi., KEK-Report 97-01 (1997) p.36-48
- [3] N.Yamamoto, et al., J. Appl. Phys. 102, (2007) 024904
- [4] Y.Yamazaki, et al., Nucl. Instr. and Meth. A322 (1992) 139-145.
- [5] N.Yamamoto, et al., Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan. p165-167
- [6] P.Hartmann, et al., J. Appl. Phys. **86**, (1999) 2245