

Extraction of high bunch charge from GaAs and GaAs/GaAsP superlattice photocathode

Masahiro Yamamoto^{*A)}, Naoto Yamamoto^{A)}, Ryosuke Sakai^{A)}, Tsutomu Nakanishi^{A)}, Shoji Okumi^{A)}, Masaharu Miyamoto^{A)}, Makoto Kuwahara^{A)}, Kuniaki Tamagaki^{A)}, Takanori Morino^{A)}, Atsushi Mano^{A)}, Akira Utsu^{A)}, Tohru Ujihara^{B)}, Yoshikazu Takeda^{B)}, Masao Kuriki^{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)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK),
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

Advanced accelerators as well as International Linear Collider (ILC) and Energy Recovery Linac (ERL) require high charge ($>6.4\text{nC}$ for ILC), high density ($\sim 5\text{A}/\text{mm}^2$ for ERL) electron beam at an electron source. We developed 200keV load-lock gun to produce ILC single bunch beam and ERL high average current beam.

Both of GaAs/GaAsP superlattice and bulk-GaAs photocathode were used for this experiment. Using GaAs/GaAsP photocathode, the bunch charge of 8nC was produced at the source in a 1.6ns bunch with a 20 mm diameter laser spot at the photocathode for ILC, and 3pC in 25ps bunch was extracted for ERL with $\sim 1.6\text{mm}$ laser spot diameter, respectively.

GaAs及びGaAs/GaAsP超格子フォトカソードからの高密度バンチビーム生成

1. はじめに

リニアコライダー(ILC)ではスピン偏極した電子ビームが必要とされており、大電荷かつ低エミッタンスビームが必要とされている。我々はこれらの要求を達成すべく電子銃およびフォトカソード開発を進めてきた^[1]。また近年、電子源への高輝度ビーム生成の要求が高く、NEA-GaAs型フォトカソードを用いた高電界 DC 電子銃はビーム発生時のエミッタンスを小さく抑えられる^[2]ことからエネルギー回収型ライナック(ERL)用電子源の有力な候補となっている。

電子ビームの引出し制限は、空間電荷制限の他に NEA 表面に特有な制限を受け、これを我々は表面電荷制限と呼んでいる。この現象はレーザー照射によってフォトカソード内部で励起された電子の一部が真空中へ脱出できずに表面に蓄積され、その結果後続の電子に対して真空順位が上昇することにより引起される。そのためにこの現象は、短パルスかつ高繰返し率のビーム引出しを厳しく制限し問題となる。この問題の解決には、①表面高ドープ処理により、脱出できず表面に蓄積した電子のホール再結合を容易にさせる②伝導帯電子の真空順位に対するエネルギーを相対的に高めるため、超格子構造によるミニバンド形成を利用して真空中への脱出を促し蓄積を抑える手法が有効であることがすでに示されている^[3]。

我々はこれまで InGaAs/AlGaAs 超格子フォトカソードよりパルス幅 $\sim 1\text{ns}$ 、電荷量 1nC/bunch、電流密度

では約 $7\text{mA}/\text{mm}^2$ まで表面電荷制限を受けることなく引出せることを確認している^[4]。

本稿では ILC が要求するパルス幅、電荷量を満足するナノ秒シングルバンチの引出しと、ERL 電子源の前段階試験として、小放出面積からのピコ秒バンチビームの引出し試験の結果について述べる。

	ILC ^[5]	ERL ^[6]
電荷量	6.4nC(3.2nC)	77pC (7.7pC)
バンチ幅	$< 2\text{ ns}$	$< 20\text{ ps}$
バンチ間隔	337 ns	770 ps
Norm. ϵ_{rms}	$< 10\pi\text{.mm.mrad}$	$< 0.5\pi\text{.mm.mrad}$
特記	Pol. $> 80\%$	Iavg (10) $\sim 100\text{ mA}$

表:1 ILC および ERL が電子源に要求する代表的なビームパラメーター

2. フォトカソードおよび実験装置

2.1 フォトカソード

本実験ではフォトカソードとして GaAs 結晶および GaAs/GaAsP 超格子結晶を使用した。

GaAs 結晶は P 型高ドープ結晶(Zn ドープ量 $1.4\times 10^{19}/\text{cm}^2$)を使用した。超格子結晶はこの GaAs 基板上にバッファ層($\text{GaAs}_{0.64}\text{P}_{0.36}$)を $2\mu\text{m}$ つんだ後、ポテンシャル障壁層($\text{GaAs}_{0.64}\text{P}_{0.36}$)および井戸層(GaAs)それぞれ 4nm、12組の超格子層を積み、最表層 5nm の GaAs 層には $\sim 6\times 10^{19}/\text{cm}^3$ の高 Zn ドープを行ったものを使用した^[7,8]。本超格子結晶は工学研究科の MOCVD 装置にて作製された。

* yamamoto@spin.phys.nagoya-u.ac.jp

2.2 電子銃

本ビーム引出し試験ではロードロック付き 200keV 電子銃を用いた^[9]。導入されたフォトカソードは超高真空 ($<10^{-8}$ Pa) 環境の活性化 Chamber にて 450~500°C の加熱洗浄を行った後に Cs 蒸着と O₂ (または NF₃) 導入により NEA 表面が形成される。これを、極高真空 (1.8×10^{-9} Pa) に保たれた電子銃の陰極へ装着し、試験を行っている。

本試験では印加電圧 150kV 以上において、電極間で発生する電界放出暗電流が 1nA 以上のとなる問題が発生したため、試験は -150kV および -70kV で行った。

2.3 レーザおよび光学系

ILC シングルバンチ試験用のシングルパルス光源として Q-switch YAG レーザ励起 Ti:Sapphire レーザ (半値幅~10ns, 繰返し 10Hz) を使用し、高速ポッケルセルによりピーク近傍 1~2ns をスライスする。これを 30m のマルチモードファイバ (コア径 365 μ m, NA 0.22) で電子銃直前の光学系へ移送される。フォトカソード表面でのレーザのスポット径はフォトカソード有効面積と等しい約 ϕ 20mm である。マルチモードファイバによる移送のため、フォトカソード上では場所によるレーザ強度のむらが大きい。

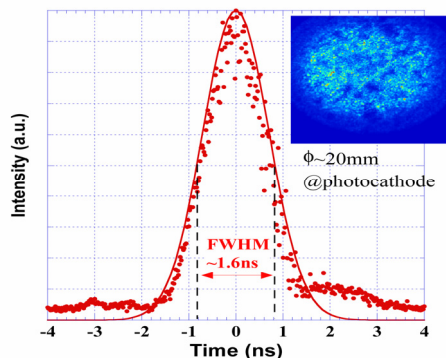


図 1 : PIN-Photodiode を用いたナノ秒レーザパルス幅測定および空間強度分布

ピコ秒バンチビームの引出し試験には繰返し 81.25MHz の Ti:Sapphire モードロックレーザを用いた。オートコリレーター (FR-103XL:femtochrome 製) によるパルス幅測定を行ったところ 25ps (Gaussian shape) であった。レーザ光はオシレータより数 m 下流の光学系へミラーを用いて直接移送される。波長 780nm にて電子銃へ移送可能なレーザの平均パワーは 450mW であり、フォトカソード上でのスポットサイズはカソード面にあたる場所に設置された CCD 素子の信号より $r_x=800\mu\text{m}, r_y=622\mu\text{m}$ であった。

電子銃への入射光学系へ移送されたナノ秒およびピコ秒レーザパルスは、レンズで収束された後、ビームライン下流約 65cm の真空中に設置された多層膜ミラーで反射されフォトカソードに対してほぼ直入射となる条件で照射される。

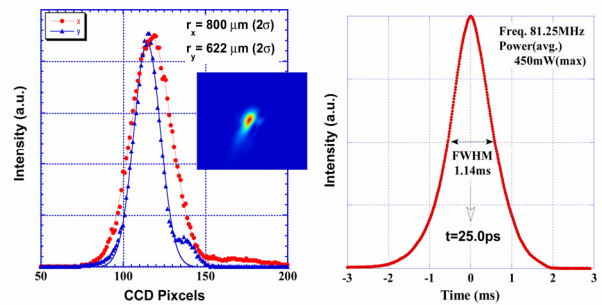


図 2 : フォトカソード位置でのレーザ空間分布 (左)、オートコリレーターによるパルス幅測定 (右)

3. 試験結果と考察

3.1 ILC シングルバンチ試験

GaAs/GaAsP 超格子フォトカソードを用い、入射レーザエネルギー約 7 μ J までの測定を印加電圧 -150kV および -70kV の場合について行った結果を図 3 に示す。縦軸のバンチ電荷量は、レーザ照射時に電源より陰極へ供給された電流値を平均化し 1 バンチあたりに換算した値である。試験時のフォトカソードの量子効率 は 2.2×10^{-3} であった。

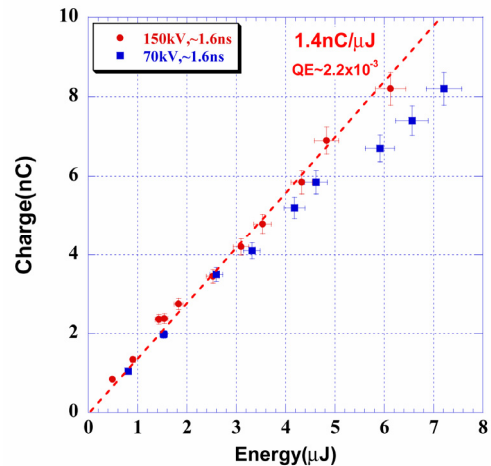


図 3 : パルス幅 1.6ns のレーザ光を照射した時の GaAs/GaAsP 超格子フォトカソードからのビーム引出し結果。

印加電圧 150kV において 8nC/bunch までほぼ入射レーザエネルギーに比例した引出し電荷が得られた。この時の電流密度は約 20mA/mm² と見積もられ、これは SLAC の 120keV 偏極電子源で同様のフォトカソードを用いて行われた結果を支持する^[10]。印加電圧 70kV では引出し電荷 5nC 以上での引出し電荷の低下は、上記の理由から空間電荷制限のみによるものであると推測できる。

また、フォトカソードを Bulk-GaAs とした場合について同様の試験を行っている。印加電圧 150kV にて 3.2 μ J 入射時に 30nC 引出された。このとき、10nC/bunch 以上で引出し電荷に制限を受けたが、①

量子効率が比較的高い、②結晶中の Zn ドープ密度も高い($\sim 1.4 \times 10^{19}/\text{cm}^3$), ③GaAs/GaAsP 超格子の場合と比較し、同等な引出し電荷量で制限を受けているため、空間電荷制限によるものと推測できる。

3.2 ピコ秒バンチ試験

ナノ秒試験と同様に GaAs/GaAsP 超格子フォトカソードへ Ti:Sapphire モードロックレーザ出力を入射し、印加電圧-150kV ついて測定を行った結果を図4に示す。

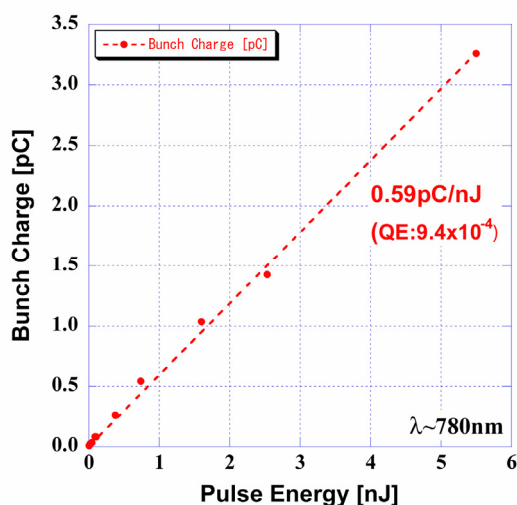


図4：パルス幅 25ps のレーザ光を照射した時の GaAs/GaAsP 超格子フォトカソードからのビーム引出し結果。

本試験では引出された電子ビームの直接観測を行っていないが、過去に Mainz 大学のグループが行った厚さ 150nm の GaAsP 薄膜フォトカソードを用いた短パルス試験では 150fs 幅のレーザ励起より約 10ps 幅の電子ビームの引出された結果が報告されている^[11]。よって今回用いた超格子の励起領域が 100nm であることから、今回の試験ではレーザパルス幅相当のビームが引出されたと推測している。

試験結果および以上の推測から、最大出力である 3.3pC/bunch についてレーザスポット面積およびレーザパルス幅から見積もられるピーク電流密度は約 $140\text{mA}/\text{mm}^2$ となる。電荷制限の現象は今回用いた GaAs/GaAsP 超格子では観測されなかった。

4. まとめ

GaAs/GaAsP 超格子結晶より ILC の要求するバンチ幅 2ns 以下、 $6.4\text{nC}/\text{bunch}$ を超えるシングルバンチビームを NEA 表面電荷制限なく引出すことに成功した。このことは、マルチバンチレーザ光源があれば、我々が開発した GaAs/GaAsP 超格子フォトカソ

ードより問題なくスピン偏極した電子ビーム生成が可能であることを意味する。

また、GaAs/GaAsP 超格子結晶からレーザパルス幅 25ps 相当、 $\sim 3\text{pC}/\text{bunch}$ のバンチビームの引出しを行い、電流密度 $100\text{mA}/\text{mm}^2$ を超える領域で表面電荷制限なく引出せることを確認した。

5. 今後の課題

ERL ビームパラメータより見積もられるフォトカソード上の電流密度 $\sim 5\text{A}/\text{mm}^2$ での表面電荷制限の確認はまだ行われていない。現在の NEA-GaAs および超格子フォトカソードが、どこまで表面電荷制限なくビームが引出せるかを確かめる必要がある。この前段階の試験として GaAs/GaAsP 超格子で行ったピコ秒試験を量子効率の高い Bulk-GaAs を用いて行う予定である。しかし Bulk-GaAs 結晶は、励起光波長 800nm 程度の吸収長 $1\mu\text{m}$ に相当する深さまで励起が行われ、その領域から電子が拡散して真空中へ放出されるため、短パルス(<数十 ps)励起を行ったとしても電子ビームは 100ps 程度のテイルを引く問題がある^[12]。20ps 幅の電子ビームを得るためにはフォトカソードの実効励起領域を数百 nm 程度に抑える必要があるが、そのままでは量子効率の低下問題が避けられない。高出力レーザの開発と、高い量子効率でかつ短パルスビームの引出しが可能な NEA-フォトカソードの開発が今後の重要な課題と言える。

REFERENCES

- [1] T. Nakanishi et al., KEK Report 97-01 (1997) p.36-48
- [2] N. Yamamoto et al., this proceedings.
- [3] K. Togawa et al., Nucl. Instr. Meth. A414 (1998) 431-445
- [4] K. Togawa et al., Nucl. Instr. Meth. A455 (2000) 118-122
- [5] Strawman BCD <http://lcdev.kek.jp/GDE/StrawBCD/>
- [6] S.M.Gruner and M.Tigner, eds., JLAB-ACT-01-04(2001)
放射光将来計画検討報告 (2003年3月)
- [7] O. Watanabe et al., AIP Conference Proceedings, 570, 1024 (2001)
- [8] T. Nishitani et al., AIP Conference Proceedings, 570, 1021 (2001)
- [9] K. Wada et al., AIP Conference Proceedings, 570, 1012 (2001)
- [10] J. E. Clendenin et al., Nucl. Instr. Meth. A536 (2005)308-311
- [11] P. Hartmann et al., Nucl. Instr. Meth. A379 (1996) 15-20
- [12] P. Hartmann et al., J. Appl. Phys., Vol. 86, (1999) 2245-2249