

EXPERIMENTS TO PRODUCE THE HIGH INTENSITY POLARIZED ELECTRON BEAM WITH A MULTI-BUNCH STRUCTURE

K.Togawa, T.Nakanishi, S.Okumi, C.Takahashi, C.Suzuki, F.Furuta, T.Ida, K.Wada
Department of Physics, Nagoya University, Nagoya, Aichi 464-01, Japan

Y.Kurihara, H.Matsumoto, T.Omori, Y.Takeuchi, M.Yoshioka
High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

T.Baba, M.Mizuta
Fundamental Research Laboratories, NEC Corp., Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

Abstract

A highly polarized electron beam with a multi-bunch structure is essential for future linear colliders. In order to investigate the multi-bunch effect of surface charge limit in NEA semiconductor photocathode, a thin layer GaAs with normal doping concentration ($5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) was tested at first by using a 70 keV polarized gun and a double-bunch Ti:sapphire laser (6 ns FWHM, 15 ns bunch separation). It becomes clear that the high intensity multi-bunch beam can not be produced from this photocathode due to the NEA surface charge limit. Next, an AlGaAs-GaAs superlattice photocathode with a modulation doping (high doping in 5 nm thick surface and low doping in the interior) has been tested. A high intensity polarized electron beam of 42 nC in 30 ns macro-pulse including two bunches could be generated. This charge is limited by space charge effect. These results show the modulation doping method is suitable for the production of the high intensity polarized electron beam with a multi-bunch structure.

マルチバンチ高密度偏極電子ビームの生成実験

1. はじめに

次世代加速器のリニアコライダーにおいて偏極電子ビームは、超対称性粒子の探索実験等に非常に効果的な役割を果たすことが期待されている。名古屋大学を中心とした偏極電子源開発グループは高い偏極度を持つ新しいフォトカソードである「歪みGaAs半導体」を世界に先駆けて開発し、80%を超える偏極度を得ることに成功した。現在は高い偏極度とともに高い量子効率を持つと期待されている「歪み超格子半導体」の開発を行っている。

偏極電子ビームを生成するには、まず、半導体フォトカソードのバンド間エネルギーに相当する波長を持った円偏光レーザーを半導体フォトカソードに照射することで、過電子帯から伝導帯にスピン状態を選択して励起する。この偏極電子を真空中に引き出すためには表面にセシウム原子と酸素原子をわずかに数原子層だけ蒸着して作り上げる、負電子親和性表面 (Negative Electron Affinity、以下NEA) を必要とする。NEA表面は電子銃内部の残留ガスや電極間暗電流による汚染に対して非常に敏感であり、この事実が、半導体フォトカソードを加速器用電子銃に適用することを困難な課題としてきた。我々のグループは数年前に100keV直流型偏極電子銃(試作2号機:NPES-2)の開発を開始した。開

発当初は多大な電極間暗電流($\sim 2\mu\text{A}$)によるNEA表面の劣下が原因となって光電流がわずかに数時間しか引き出せないといった深刻な問題が明らかとなった。そこで、電極間暗電流が発生しやすい陰極エッジの電界を小さくするなど電極形状の最適化を行い、さらに、電極表面を電界複合研磨と温超純水洗浄により暗電流の原因となる非金属性不純物の排除を行うことで100kV印加時の暗電流を10nA以下に削減し、フォトカソードの寿命を50時間以上まで引き延ばすことに成功した[1]。NPES-2はロードロック機構(NEA表面活性化を電子銃とは別の真空槽で行い、真空を破らずにフォトカソードを交換する)を備えていないためにNEA表面活性化時に拡散したセシウム原子が陰極のフォトカソード以外の部分にも付着し、電極間暗電流の増加を引き起こした。これも偏極電子銃の深刻な問題であるが、開発中のリニアコライダー用200keV偏極電子銃(NPES-3)には装着する予定である[2]。NPES-2ではこの問題を回避するために印加電圧を70kVに落として運転している。

NEA表面に関して解決しなければならないもう一つの問題が存在する。一般に空間電荷制限電流値は電極の形状によって決まるパーピアンズと印加電圧の $3/2$ 乗に比例する。ところが、NEA表面を使

って高密度電子ビームを引き出す場合は、真空中に脱出できなかった電子群がNEA表面のバンドベンディング領域に留まり、この電荷が後続の電子に対するポテンシャル障壁となり空間電荷制限値よりも小さい電流値で引き出し電流値を制限してしまうといった新しい電荷制限が1992年にSLACで発見された[3]。この現象はNEA表面電荷制限効果と呼ばれる。NEA表面電荷制限効果はリニアコライダーで要求されるような大電流のマルチバンチビームを生成する際には深刻な問題となることが予想される。そこで、この解決策を見い出すためにNPES-2を用いてマルチバンチ生成時におけるNEA表面電荷制限効果の研究を行った。

2. 実験装置

電子銃の真空度は 10^{-11} torr台、暗電流は70kV印加時で10nA以下とフォトカソードの寿命に特に悪影響を及ぼさない値を保持して実験を行った。レーザーは直径14mmのフォトカソード全体に照射した。シミュレーションコードEGUNにより求めた70kV印加時の空間電荷制限電流値は1.64Aである。

レーザー装置はNd:YAGレーザーを励起光源としたTi:sapphireパルスレーザーを使用した。レーザーのバンチ幅は6ns、繰り返しは10Hz、可変波長域は710nm~910nmである。beam splitterと4.5m delay line、そして、beam combinerを用いてバンチ間隔15nsのマルチバンチレーザーを作製した。レーザーは光ファイバー(マルチモード、コア径200 μ m、NA値0.35)を用いて電子銃まで移送している。光ファイバーの破損を防止するためにレーザーのエネルギーは50 μ J/bunch以下に抑えている。図1にPINフォトダイオードで測定したレーザー波形を示す。

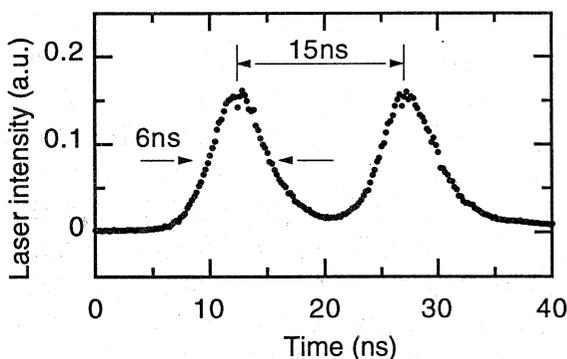


図1 Ti:sapphire レーザーの波形

電子ビームのバンチ当りの電荷量は、高電圧ケーブルから電子銃に流れ込む平均電流値から求めた。電子ビームパルス波形は1.3m下流のファラデーカップと400MHzオシロスコープで測定した。

偏極度測定にはcw Ti:sapphireレーザーを用いた。引き出した小電流連続ビームをWien filterまで輸送しスピンの向きを水平方向から垂直方向に回転した後、Mott 散乱偏極度測定装置で偏極度を測定した。

3. 100nm 薄膜 GaAs フォトカソードによる実験結果

標準的なフォトカソードである厚さ100nmのGaAs薄膜を用いたマルチバンチ生成試験を行った。ドーピング物質はBeでその密度は $5.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ である。Ti:sapphireレーザーの波長は780nmを選んだ。図2に引き出した電子バンチの電荷量とレーザーバンチエネルギーとの関係及び電子ビームの波形を示す。低出力の半導体レーザー(波長780nm、パワー~100 μ W)を用いて測定したフォトカソードの量子効率率は0.48%である。

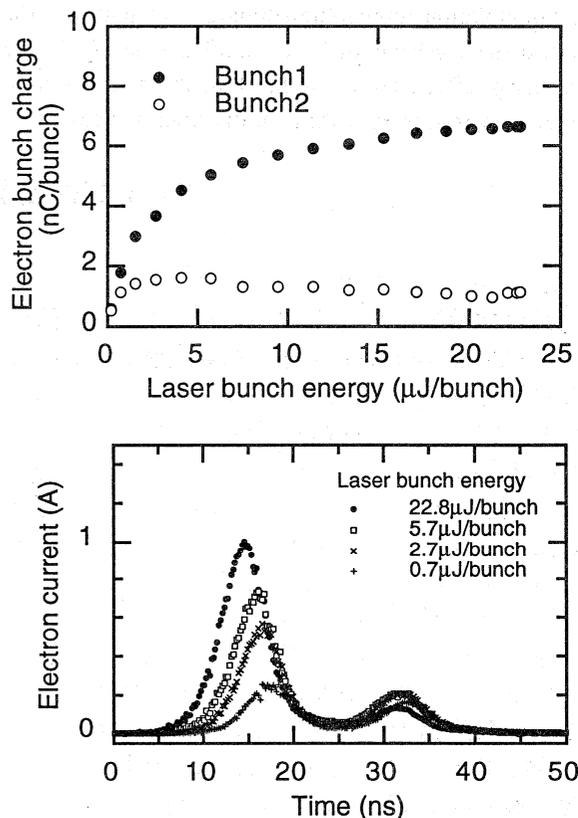


図2 100nm GaAsから引き出したマルチバンチ電子ビームの電荷量とレーザーエネルギーの関係(上)と電子ビームの波形(下)

図2よりNEA表面電荷制限効果の特徴が見られる。

- 1) レーザーエネルギーを大きくすると、フォトカソードは第1バンチの先頭部分しか正常に反応しなくなり、空間電荷制限値よりも低い値で電流が飽和する。
- 2) 第1バンチの制限効果がバンチ間隔(15ns)以

上も残存し、第2バンチは自身の制限効果と重なったさらに強い制限を受ける。

この実験から、通常の GaAs フォトカソードは NEA 表面電荷制限効果が強く働き、高密度のマルチバンチビームの引き出しが不可能であることが明らかとなった。

4. 変調ドーブ超格子フォトカソードによる実験結果

次に AlGaAs-GaAs 超格子フォトカソードの試験を行った。GaAs 層の厚さは 1.98nm、AlGaAs 層の厚さは 3.11nm、Al の混合比は 0.35 である。結晶中での減偏極を抑えるために超格子の全厚は 95nm とした。高い量子効率を得るためには高いドーピング量が必要となるが減偏極を抑えるためにはドーピング密度を低くする必要がある。この2つの要求を満たすために表面の 5nm だけ高ドーブ ($3.8 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$) とし、結晶の内部は低ドーブ ($4.8 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$) にする変調ドーピング法を採用した。ドーピング物質は Be である。大気による汚染を防ぐために結晶の表面は厚さ約 2 μm の As 膜でカバーした。As 膜は NEA 活性化前の加熱洗浄 (400 $^{\circ}\text{C}$ 、~1 時間) で除去した。

まず、超格子フォトカソードの偏極度測定を行い、波長 748nm で最大偏極度 71%、量子効率 0.65% を得た。続いて、超格子フォトカソードを用いたマルチバンチ生成試験を行った。Ti:sapphire レーザーの波長は最大偏極度が得られる 748nm に設定した。図3に引き出した電子バンチの電荷量とレーザーバンチエネルギーとの関係及び電子ビームの波形を示す。100nm GaAs 薄膜とはまったく異なる特徴を示している。

1) レーザーエネルギーを大きくすると電子バンチのピーク電流が約 1.6A で飽和し、形状がフラットトップになる。また、バンチ幅が広がる。これは空間電荷制限効果の特徴である。

2) 第2バンチも第1バンチと同様に振る舞い、殆ど第1バンチによる電荷の抑制を受けない。

これらの結果は、この超格子フォトカソードでは NEA 表面電荷制限効果が殆ど現われないことを示している。

5. 考察

超格子フォトカソードで NEA 表面電荷制限効果が殆ど現われなかった主要な要因の一つは結晶表面を高ドーブにしたことであると考えられる[4]。バンドベンディング領域や表面準位に留まった電荷を素早く(バンチ幅以下の短時間)消去するためには、バンドベンディング領域の幅を狭くして、再結合する正孔の供給量を増やす必要がある。バンドベ

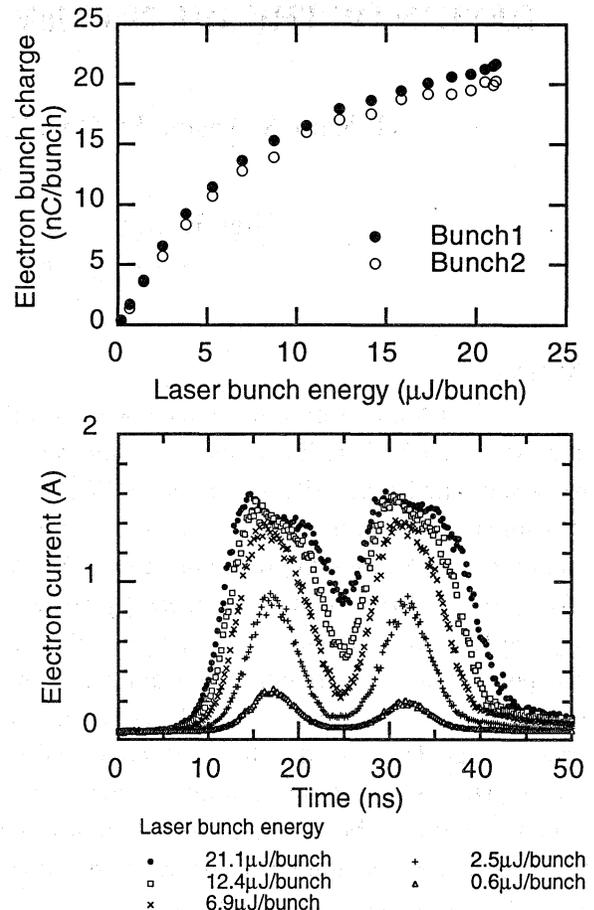


図3 AlGaAs-GaAs 超格子から引き出したマルチバンチ電子ビームの電荷量とレーザーエネルギーの関係(上)と電子ビームの波形(下)

ンディングの幅はドーピング密度の-1/2乗に比例するので、ドーピング量が高いほど正孔が表面に供給される量が多くなり制限効果が緩和されたと考えられる。

6. まとめ

変調ドーブ超格子フォトカソードを用いることにより偏極度 71% (小電流で測定)、全電荷量 42nC、バンチ数 2、パルス幅~30ns の高密度偏極電子ビームを引き出すことに成功した。今後、さらにフォトカソードの種類を替え、バンチ数を増やすなどして系統的な NEA 表面電荷制限効果の研究を行う予定である。

参考文献

- [1] T.Nakanishi et.al., Proceedings of the Sixth Workshop on Japan Linear Collider, 1996, p99-105
- [2] S.Okumi et.al., 本研究会プロシーディングス
- [3] M.Woods et.al., J.Appl.Phys.73(12),15 June 1993
- [4] A.Herrea-Gomez et.al., J.Appl.Phys.79(9),1 May 1996