

[12P-09]

PRODUCTION OF SUB-NANOSECOND MULTI-BUNCH POLARIZED ELECTRON BEAM FROM SUPERLATTICE PHOTOCATHODE

K. Togawa, T. Nakanishi, S. Okumi, C. Suzuki, F. Furuta, K. Wada, T. Nishitani, M. Yamamoto
Department of Physics, Nagoya University, Nagoya 464-8602, Japan

H. Kobayakawa, Y. Takeda, Y. Takashima, O. Watanabe
Faculty of Engineering, Nagoya University, Nagoya 464-8603, Japan

H. Horinaka, K. Wada, T. Matsuyama
College of Engineering, University of Osaka Prefecture, Sakai 599-8531, Japan

Y. Kurihara, H. Matsumoto, T. Omori, Y. Takeuchi, M. Yoshioka
High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba 305-0801, Japan

T. Baba
Fundamental Research Laboratories, NEC Corporation, Tsukuba 305-8501, Japan

Abstract

In order to realize polarization experiments at electron-positron linear colliders, the investigation to produce a sub-nanosecond multi-bunch polarized electron beam has been performed at Nagoya University. By illuminating the double-bunch laser light (0.7ns bunch width, 2.8ns bunch separation), the space-charge-limited beam ($0.6 \times 10^{10} e^-$ /bunch, 1.4ns bunch width, 2.8ns bunch separation) could be successively generated from both of GaAs-GaAsP strained-layer superlattice and InGaAs-AlGaAs strained-layer superlattice photocathodes without NEA surface charge limit phenomenon of semiconductor photocathode. We conclude that a strained-layer superlattice photocathode is the best photocathode for producing the multi-bunch polarized electron beam required for linear colliders

超格子フォトカソードによるサブナノ秒マルチバンチ偏極電子ビームの生成

1. はじめに

スピン偏極電子ビーム源は、次世代高エネルギー加速器の電子・陽電子リニアコライダーにおいて超対称性粒子の探索実験等に不可欠な実験装置としてその活躍が大いに期待されている[1]。

偏極電子ビームは半導体フォトカソードの2つの重要な原理に基づいて生成される。1) GaAs型半導体結晶にバンドギャップエネルギーに相当する光子エネルギーを持った円偏光レーザーを照射することにより、価電子のスピン状態を選択して伝導帯に励起する。2) p型の不純物を混入した結晶の表面を清浄化して低エネルギー方向のバンドベンディングを生じさせ、さらにセシウム原子と酸素原子を1原子層だけ蒸着して電気2重層を作り、真空準位を伝導帯より低い状態(負の電子親和性 - Negative Electron Affinity - 略してNEA)にした表面から偏極電子を引き出す。

さて、リニアコライダーは、高いルミノシティ($\sim 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)を実現するためにこれまでに無い高密度のマルチバンチ偏極電子ビーム(電子数 $2 \times 10^{10} e^-$ /bunch, バンチ幅 $\sim 0.7 \text{ ns}$, バンチ間隔 2.8 ns ,

バンチ数 $\sim 70 \text{ bunches/pulse}$)を要求するのであるが、通常のGaAsを用いるとNEA表面に起因した電荷制限現象が生じることが1991年にSLACによる実験で明らかになった[2]。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蓄積し、この電荷が真空準位を引き上げて後続の電子の脱出を妨げるため、引き出し電流が空間電荷制限よりも小さい値に制限されてしまうのである。我々はこの「NEA表面電荷制限現象」を克服するために系統的な研究を行った。そして、高い表面不純物密度を持つ超格子フォトカソードを用いると空間電荷制限のマルチバンチ偏極電子ビーム(ピーク電流1.6A、バンチ幅12ns、バンチ間隔15ns、バンチ数4)の引き出しが可能であることを実験で明らかにした[3]。

NEA表面電荷制限を克服する方法が実験的に証明されたものの、生成したマルチバンチビームの時間スケールはリニアコライダーの要求値より1桁大きく、まだ満足できるものではなかった。リニアコライダーのバンチ構造を持つ偏極電子ビームが生成できることを実証するために、試験用レーザー装置に改良を加えてサブナノ秒幅のダブルバンチ

レーザー光を発生し、新しく開発した GaAs-GaAsP 歪み超格子フォトカソードによるマルチバンチ偏極電子ビームの生成実験を行った。

2. フォトカソード

実験に使用した GaAs-GaAsP 歪み超格子フォトカソード (サンプル番号 SLSP#9) の断面模式図を図 1 に示す。

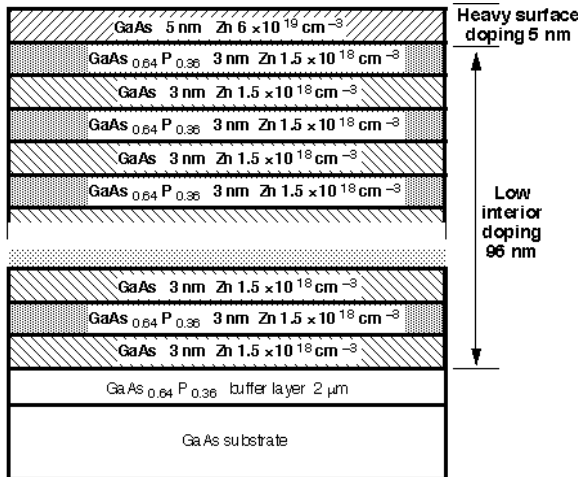


図 1 : GaAs-GaAsP 歪み超格子フォトカソードの断面図

50%を超えるスピン偏極度を達成するためには価電子帯のスピン状態の縮退をエネルギー的に分離する必要がある。本サンプルは比較的大きい価電子帯バンドオフセット値を持つため ($Q_v=0.60$)、量子閉じ込め効果による縮退分離が大きくなると考えられる。また、量子井戸の GaAs 層に約 1% の歪みがかかっており、歪による縮退分離効果が加算的に働くので、高い偏極度を期待することができる。Kronig-Penny-Bastard モデルによる計算から、本サンプルの縮退分離幅は 103meV と見積もられた。また、バンドギャップが大きい結晶であるため ($E_g=1.61\text{eV}$)、同時に高い量子効率も得られると期待される。

電子放出過程におけるスピン減偏極を抑えるために超格子内部の不純物密度は $1.5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ と標準値 ($\sim 5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$) より低い値に選び、NEA 表面電荷制限を回避するために最表面の GaAs 層 (層厚 5 nm) だけ $6 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ と 1 桁大きい値に選んだ。本サンプルは名古屋大学大学院工学研究科の MOCVD 装置を用いて作製された。

3. 実験装置

サブナノ秒幅のレーザーバンチは高速ポッケルスセルを用いて親パルスを切り出す手法で生成した。レーザーシステムの全体図を図 2 に示す。サブナノ秒ダブルバンチレーザー光の生成原理は以下の通りである。まず、Nd:YAG レーザーの第 2 高調

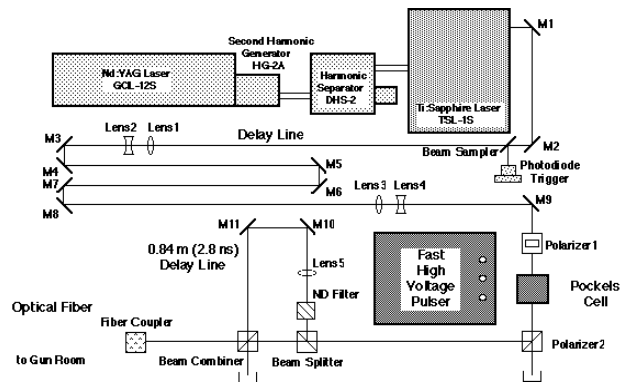


図 2 : サブナノ秒ダブルバンチレーザーシステム

波を励起光源とした Ti:sapphire レーザーにより半値幅 7 ns のパルス光を繰り返し 10 Hz で生成する。この親パルスの中心がポッケルスセル (Fast Pulse Technology 社, Model 1112) を通過するタイミングに合わせて、高速パルス電源 (Kentech 社, HMP2/V/NP) で発生した矩形の高電圧パルス (半値幅 0.7 ns, 電圧 $\sim 4\text{kV}$) をポッケルスセルの KD*P 結晶に印加し、0.7 ns 分だけレーザー光の直線偏光面を 90° 回転する。変調を受けた 0.7 ns の成分はポッケルスセルの直後に置かれた直線偏光素子によって、入射軸と垂直な方向に切り出される。ダブルバンチ構造はビームスプリッターと 2.8 ns の遅延光路の組み合わせによって生成した。図 3 に PIN フォトダイオードで測定したレーザー波形を示す。

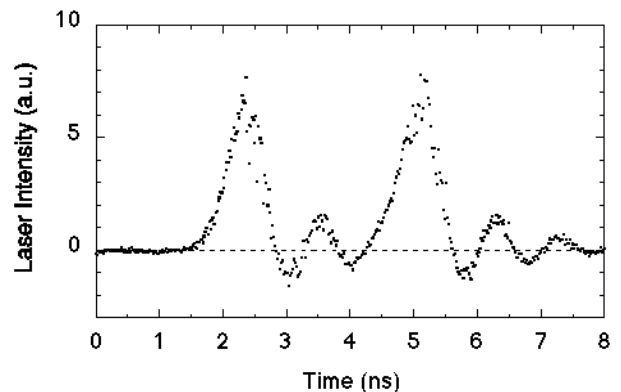


図 3 : サブナノ秒ダブルバンチレーザーの波形

電子銃と Mott 偏極度測定器については文献 3 に詳細が記述されているのでそれを参照されたい。

4. 実験結果と考察

まず、サンプルの基本特性である偏極度と量子効率を測定した。これらのレーザー波長依存性を図 4 に示す。レーザー波長 773 nm において最大偏極度 81%、量子効率 0.3% が得られ、高い偏極度と高い量子効率の両立が実現できることを確認した。

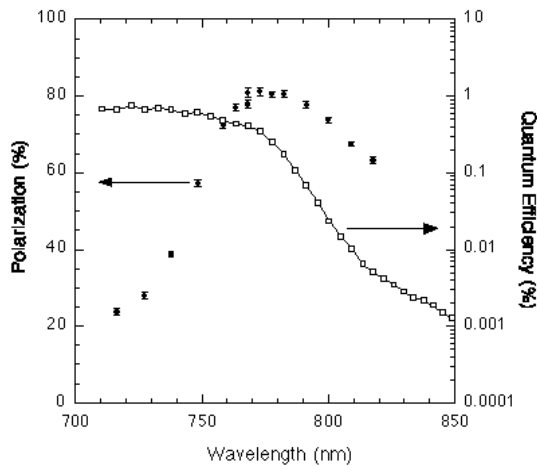


図4：GaAs-GaAsP歪み超格子フォトカソードから引き出した偏極電子ビームの偏極度と量子効率のレーザー波長依存性

次に、サブナノ秒ダブルバンチビームの生成試験を行った。レーザー光の波長は最大偏極度を与える773nmに調整し、直径14mmのフォトカソードの全面に照射した。電子銃に印加した電圧は50kVで、EGUNシミュレーションで求めた空間電荷制限電流値は1.0Aである。小出力のHeNeレーザー（波長633nm）でモニターした量子効率は2.1%であった。図5に引き出した電子ビームの電荷量とレーザーエネルギーの関係およびフォトカソードから1m下流に設置したFaradayカップでモニターした電子ビームの波形を示す。両バンチともレーザーエネルギーを増加するのに伴って空間電荷制限の領域（ $\sim 1\text{nC}$ ）で電荷量が飽和し、高密度のレーザーを照射した状態でも両バンチが均等に前後対称な形状で生成されていることは、NEA表面電荷制限が生じなかったことを意味している。ビーム波形から見積もったバンチ当りの電子数は $0.6 \times 10^{10} \text{e}^-/\text{bunch}$ である。ピーク電流が空間電荷制限値より低い値で飽和し、バンチ幅が1.4nsまで広がっているのは、ビームエネルギーが50keVと低いためにビーム軸方向の空間電荷が無視できず、デバンチング現象が起こったことが原因であると考えられる。

最後に、NEC基礎研究所で作製されたInGaAs-AlGaAs歪み超格子によっても同様の成果が得られていることを付記しておく[4]。

5. まとめ

本実験の結果とリニアコライダーの要求値を表1にまとめる。高い表面不純物密度の歪み超格子を用いると、リニアコライダーが要求する強度と時間構造をほぼ満たしたダブルバンチビームが生成可能であることが実証された。次の課題は、1)バンチ当りの電子数を満足すべく空間電荷制限値を引き上げた200keV偏極電子銃を作製すること、2)強

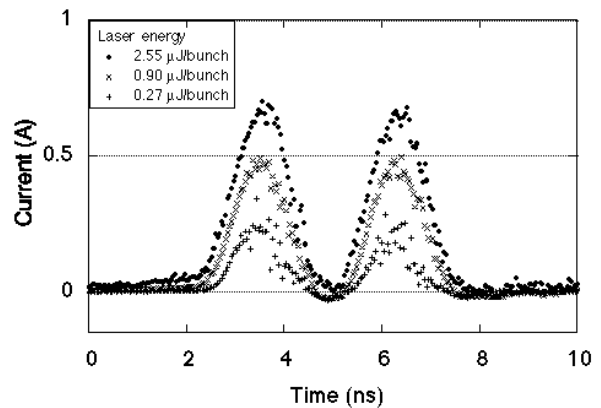
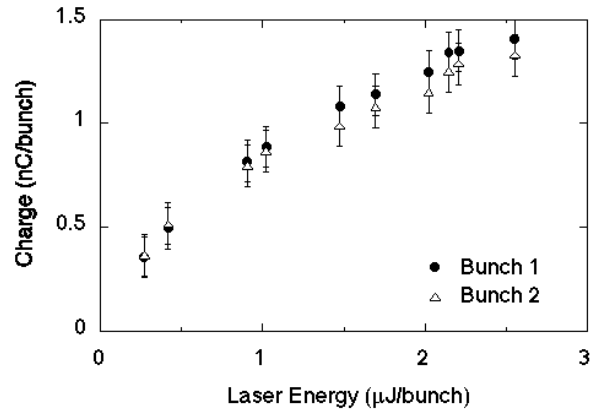


図5：GaAs-GaAsP歪み超格子フォトカソードから引き出したダブルバンチ電子ビームの電荷量の飽和曲線（上）とビーム波形（下）

	Electrons /bunch	Bunch Width	Bunch Separation	Bunch Number	Intensity Jitters
Exp.	0.6×10^{10}	1.4ns	2.8ns	2	10%
LC	2×10^{10}	0.7ns	2.8ns	~ 70	1%

表1：実験結果とリニアコライダーの要求値との比較

度ジッターを抑えバンチ総数を満足するマルチバンチレーザー装置を開発することであり、現在これらの課題に取り組んでいる。

本研究の一部は文部省科学研究費補助金（No.10138101, No.10354003, No.10003135）及びKEK共同開発研究費（No.98-01, No.99-019, No.2000-02）を用いて実施された。

参考文献

- [1] JLC-1, KEK-Report 92-16 (1992)
JLC Design Study, KEK-Report 97-01 (1997)
- [2] R. Alley et al., Nucl. Instr. Meth. A365 (1995) 1
- [3] K. Togawa et al., Nucl. Instr. Meth. A414 (1998) 431
- [4] K. Togawa et al., International Symposium on New Visions in Laser-Beam Interactions, 1999, Tokyo, Japan, to be published in Nucl. Instr. Meth.