

[F16p11]

Developments of Semiconductor Photocathodes with Superlattice Structures for Polarized Electron Source

K.Wada, T.Ida, F.Furuta, T.Nakanishi, S.Okumi, S.Nakamura, K.Togawa, C.Suzuki, T.Nishitani, M.Yamamoto,
M.Yoshioka¹, T.Omori¹, Y.Kurihara¹, H.Horinaka², K.Wada², T.Matsuyama², T.Baba³, T.Kato⁴ and T.Saka⁵

Department of Physics, Nagoya University, Furo-chou, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8602, Japan

(1) High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, 305-0801, Japan

(2) College of Engineering, University of Osaka Prefecture, Sakai, 599-8531, Japan

(3) Fundamental Research Laboratories, NEC Corporation, Tsukuba, 305-8501, Japan

(4) New Materials Research Lab., Daido Steel Co.Ltd., Nagoya, 457-8531, Japan

(5) Department of Applied Electronics, Daido Institute of Technology, Nagoya, 457-8531, Japan

Abstract

Our collaboration group have continued the research to develop the high performance photocathodes to produce the multi-bunch polarized electron beam which satisfies the requirement of a future 1 TeV electron-positron linear collider (JLC). Here, we report the results of electron spin polarization (ESP) and quantum efficiency (QE) measurements, which were obtained using the photocathodes with superlattice structures of InGaAs-AlGaAs combination. The design considerations of the new type of GaAs-GaAsP strained-layer superlattice photocathode are also described.

偏極電子源に用いる半導体超格子フォトカソードの開発

1. はじめに

高エネルギー物理実験の次期将来計画として開発研究が進められている電子陽電子リニアコライダーにおいて、スピン偏極電子ビームは超対称性粒子の探索実験などに非常に大きな役割を果たすことが期待されている。我々はスピン偏極電子源に用いる高性能フォトカソード、つまり高い電子スピン偏極度 (ESP) と高い量子効率 (QE) をあわせ持つフォトカソード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ギャップ幅に相当するエネルギー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によって、電子を価電子帯から伝導帯にスピン状態を選択して励起する。励起された偏極電子を真空中に引き出すために、フォトカソード表面にセシウムと酸素をわずか数原子層だけ蒸着して実現する負の電子親和性 (Negative Electron Affinity, NEA) 表面を利用する。

これまで我々は、高いESP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ESPを得ることに成功した[1]。並行して、高いESPとともに高いQEを持つと期待されている「歪み超格子半導体」の開発を

続けてきた。それは半導体を超格子構造にすることで形成されるミニバンドが、より広いバンドギャップを形成する可能性があることと、超格子構造だと歪みをかけなくても原理的に価電子帯の縮退がとけて重い正孔と軽い正孔を分離させることができるからである。歪みをかけるとさらに大きな分離幅ができ、より高いESPが期待できる。我々はまず歪みのないGaAs-AlGaAs超格子フォトカソードを開発し、ESP=68%, QE=0.9%を得た。しかしこれは偏極度に不満が残るものであったため、次にこれを改善するために超格子に歪みを加えたInGaAs-GaAs (略してSLS) フォトカソードを開発し、ESP=88%, QE=0.01%を得た。歪みを加えたことでESPについては確かに改善されたがQEは逆に下がってしまい、残念ながら高いESPと高いQEをあわせ持つフォトカソードを得ることはできなかった。そこで我々はよりバンドギャップを大きくできるInGaAs-AlGaAs歪み超格子 (略してSLSA) フォトカソードを開発し、ESP=80%, QE=0.7%を得ることに成功した[2][3]。この系列の超格子の実験結果は3章で述べ、最近開発を始めたGaAs-GaAsP (略してSLSP) フォトカソードについては4章で述べる。

表 1 : Specification and Performance of $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}-\text{Al}_y\text{Ga}_{(1-y)}\text{As}$ Superlattices

Crystal Name	x	y	L_w	L_B	$\delta_s(\text{meV})$	$W_c(\text{meV})$	Max.ESP(%)	QE(%)	λ (nm)
SLSA#1	0.15	0.35	6	25	82	8	73	0.1	745
SLSA#2	0.15	0.35	5	11	58	112	80	0.7	745
SLSA#3	0.15	0.35	7	11	73	73	80	0.09	779
SLSA#4	0.15	0.25	7	11	56	98	87	0.03	825
SLSA#5	0.15	0.15	7	11	171	129	84	0.04	855
SLS#2	0.15	0.00	7	11	30	189	88	0.01	920

x : fraction of In

δ_s : energy splitting between the top of hh and lh minibands

y : fraction of Al

W_c : energy-broadening of conduction band

L_w : thickness of InGaAs (Well) layer

QE : quantum efficiency at the maximum ESP

L_B : thickness of AlGaAs (Barrier) layer

λ : laser wavelength which gives maximum polarization

NEA表面から高密度の電子ビームを引き出す場合、真空中に脱出できなかった電子がフォトカソード表面のバンドベンディング領域にたまり、この電荷によるポテンシャル障壁が真空中に脱出する後続の電子数を制限するといった表面電荷制限が1992年にSLACで発見された[4]。最近我々のグループによってこの表面電荷制限を克服するのに超格子フォトカソードが非常に有用であることが明らかになった[5]。この意味でも、高性能の超格子フォトカソードの開発が重要であることを付け加えておく。

2. 実験装置

この研究のフォトカソード性能試験に用いた装置は、NPES-1 (Nagoya Polarized Electron Source 1号機) である。この装置の真空度は 10^{-10} Torr台で、長時間安定して電子を取り出すために、カソードとアノード間の加速電圧は4kVに抑えて設計されている。連続 Ti:sapphire レーザーの波長はミラーを交換することによって、700nm~850nm, 850nm~1000nmの間で選択することができる。カソードから出た電子は縦偏極をしているためにこれを90°バンド用の球形コンデンサーによって横偏極に変えた後、100keVまで加速してMott散乱を利用した偏極度測定を行っている。

3. SLSAフォトカソードによる実験

InGaAs-AlGaAs歪み超格子では、電子にとってInGaAs層が井戸層、AlGaAs層が障壁層になってい

る。AlGaAsの格子定数はGaAsのそれとほぼ同じなのでGaAs基盤の上に超格子を形成するとInGaAs層に歪みをかけることができる。ドーピング密度は内部で $5 \times 10^{17}/\text{cc}$ 、表面で2桁多い $4 \times 10^{19}/\text{cc}$ とした。

今回性能を測定したフォトカソードはSLSA中のAl含有率を0.35,0.25,0.15と変えたものである。その他の構造パラメーターとESP,QEの測定結果を表1に示す。また図1にSLSA#3~#5及びSLSA系で $x=0.0$ であるとみなせるSLS#2の最大ESP(●)と、このときのQE(△)のデータをまとめた。最大ESPでのレーザーの励起波長、つまり超格子結晶のバンドギャップが大きい方がQEが良く、ESPは悪い傾向にあることがわかる。図2にSLSA#5に関するESP(●)とQE(△)のレーザー波長依存性を示す。

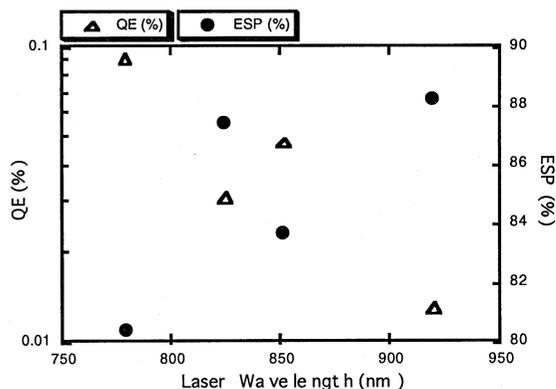


図 1 : 左からSLSA#3,#4,#5,SLS#2の最大ESPと、そのときのQE

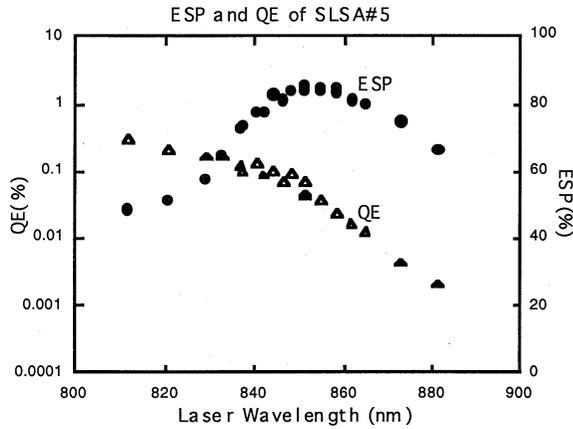


図 2 : SLSA#5のESPとQE

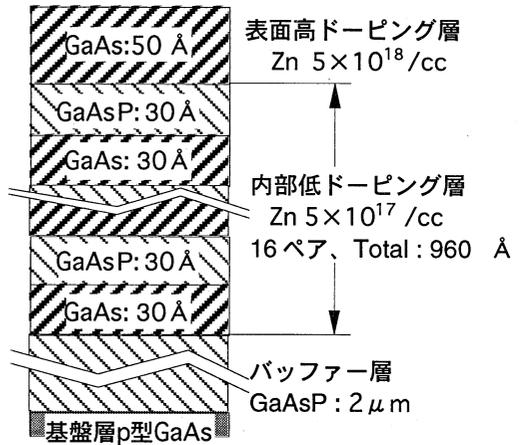


図 3 : SLSPフォトカソードの超格子構造

4. SLSPフォトカソードによる実験

GaAs-GaAsP歪み超格子ではGaAs層が井戸層、GaAsP層が障壁層になっており、GaAs層に歪みをかけるためにGaAsP基盤の上に超格子を形成する。さて井戸層、障壁層のバンドギャップの差は伝導帯と価電子帯に割りふられ、バンドオフセット (ΔE_c と ΔE_v) と呼ばれる。これらは超格子を形成する物質によって異なるが、SLSPの場合、価電子帯のバンドオフセット (ΔE_v) がSLSAのそれに比べて大きい[6]。従って、価電子帯の重い正孔(hh)と軽い正孔(lh)ミニバンドがより大きく分離され、高いESPが期待できる。3章で述べた実験結果から明らかのように、大きなバンドギャップを持つ超格子は高いQEが期待できるので、SLSPフォトカソードは我々が求める高いESPと高いQEをあわせ持つフォトカソードになりうる可能性がある。

最初に試作したSLSPフォトカソードを表2に示し、その超格子構造とバンド構造を図3、図4に示す。

表 2 : Specification of GaAs-GaAs_(1-x)P_x Strained-Layer Superlattices

Crystal Name	x	ΔE_v (hh)	δ_s	λ (nm)
SLSP#1	0.2	129	56	830
SLSP#2	0.35	226	107	810

x : fraction of P

δ_s (meV), W_c (meV), λ (nm)の値は計算値

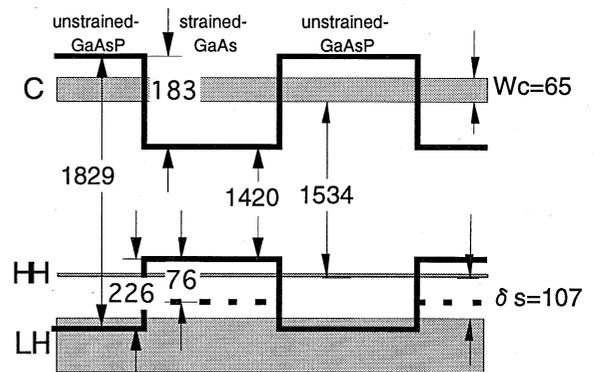


図 4 : SLSP#2フォトカソードのバンド構造
数字の単位はmeV

5. まとめ

SLSAフォトカソードによる実験から80%以上のESPが得られることと、バンドギャップの大きい超格子がQEが高い傾向にあることが確認できた。さらなる高性能のフォトカソードを得るため、SLSPフォトカソードの開発を始めた。

本研究の一部は文部省科学研究費補助金 (No.1013101, No.10354003, No.10003135) 及び、KEK共同開発研究費 (No.98-001) を用いて実施された。

参考文献

- [1] T. Nakanishi et al., Phys. Lett. A158 (1991) 345
- [2] T. Nakanishi et al., AIP Conf. Proc. 421 (1997) 300
- [3] 多和田正文 1996年博士論文「歪み超格子による偏極電子源フォトカソードの開発」
- [4] M. Woods et al., J. Appl. Phys. 73 (1993) 15
- [5] K. Togawa et al., DPNU-98-11, to be published in Nucl. Instr. and Meth. A
- [6] H. Yaguchi et al., Jpn. J. Appl. Phys. 32 (1993) 544