

高い偏極度、量子効率を併せ持つGaAs-GaAsP歪み超格子フォトカソードの開発

西谷 智博^{1,A)}、渡辺 修^{B)}、山本 将博^{A)}、中西 彊^{A)}、奥見 正治^{A)}、渡川 和晃^{C)}、田中仙君^{A)}、
古田 史生^{A)}、宮本 延春^{A)}、桑原 真人^{A)}、山本 尚人^{A)}、浪花 健一^{A)}、小早川 久^{B)}、
高嶋 圭史^{B)}、竹田 美和^{B)}、坂 貴^{D)}、加藤 俊宏^{E)}、堀中 博道^{F)}、松山 哲也^{F)}

A) 名古屋大学大学院 理学研究科 〒464-8602 愛知県名古屋市千種区不老町

B) 名古屋大学大学院 工学研究科 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町

C) 理化学研究所 播磨研究所 〒679-5148 兵庫県佐用郡三日月町光都1-1-1

D) 大同工業大学 工学部 〒457-8530 愛知県名古屋市南区滝春長10-3

E) 大同特殊鋼 技術開発研究所 〒457-8545 名古屋市南区大同町2-30

F) 大阪府立大学 工学部 〒599-8531 大阪府堺市学園町1-1

概要

次世代のリニアコライダー（GLC）計画において、超対称性粒子探索に偏極電子ビームは重要な役割を担うことが期待されている^[1]。これには、高い偏極度、高い量子効率、マルチパンチビーム生成等の性能が必要とされる。そこで我々は、バンドオフセットの利点に着目したGaAs-GaAsP歪み超格子フォトカソード開発を始めた。現在までに名古屋大学大学院工学研究科で試作した結晶で偏極度92%、量子効率0.5%という従来のInGaAs-AlGaAs歪み超格子フォトカソードの性能に優るとも劣らぬ性能を達成できた。更に表面電荷制限効果を受けることなくサブナノ秒マルチパンチビームが生成できることも確認できた。

1. はじめに

GLC計画では偏極電子源フォトカソードに高い偏極度(>90%)、高い量子効率、NEA表面電荷制限現象^[1]のないマルチパンチ電子ビームの引き出しできる性能が要求される。

GaAs型フォトカソードからの偏極電子ビームは、二つの重要な原理に基づいて生成される。1)バンドギャップ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表面を清浄化して、下方へのバンドベンディングを生じさせ、更にセシウム原子と酸素原子を蒸着して、真空準位を伝導帯より低い状態(Negative Electron Affinity -NEA-)にした表面から偏極電子を引き出す。

50%を超えるスピン偏極度を達成するためには、価電子帯のスピ状態の縮退をエネルギー的に分離する必要がある。Zinc-Blende型半導体であるGaAsでは、点において重い正孔、軽い正孔準位の縮退のため最高偏極度が50%に制限される。100%近くスピンの偏極した電子を引き出すため、我々は、この縮退を解く方法として、1)格子不整合により結晶に歪みを加えることで、重い正孔と軽い正孔に対してそれぞれ

異なる摂動エネルギーを与えることによる縮退の分離(歪み結晶)、2)バンドギャップの違う異種半導体を幾層も重ねることで多重量子井戸構造を形成し、量子閉じ込め効果による縮退の分離(超格子構造結晶)に着目し、歪みGaAsフォトカソード(偏極度86%、量子効率0.1%)やGaAs-AlGaAs超格子構造フォトカソード(偏極度68%、量子効率0.9%)を開発してきた^[2]。更にGaAs-AlGaAs超格子構造フォトカソードでは量子効率が高く、歪みGaAs構造では偏極度が高くできることに着目し、我々はこれら二つの効果を兼ね備えた歪み超格子構造フォトカソードとして、InGaAs-GaAs歪み超格子フォトカソード(偏極度91%、量子効率0.004%)、InGaAs-AlGaAs歪み超格子フォトカソード(偏極度80%、量子効率0.7%)の開発を行ってきた^[2]。また、NEA表面電荷制限現象克服問題においては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パンチ偏極電子ビームの引き出しが可能であることを実験で明らかにした^[3]。

本研究では、NEA表面電荷制限現象が起きず、InGaAs-AlGaAs歪み超格子構造フォトカソードより高性能な歪み超格子構造フォトカソードとして、GaAs-GaAsP歪み超格子フォトカソードの開発を追求した。GaAsPはバンドギャップを大きくとることで高い量子効率が期待できる。また障壁層にこれまでの伝導帯軌道を形成する族(Al, In)原子を混晶する代わりに価電子帯軌道を形成する族(P)原子を混晶することで、従来の超格子より井戸層、障壁層界面での価電子帯バンドオフセットを大きくし、重い正孔と軽い正孔の分離幅(エネルギースプリッティング)を大きくとることにより高い偏極度が期待できる。

2. GaAs-GaAsP歪み超格子フォトカソード

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SLSP-1、-2、-3の断面模式図を図1に示す。

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

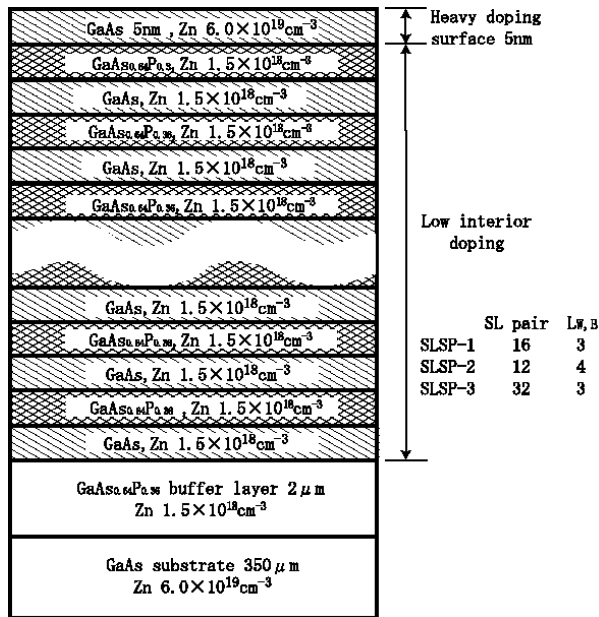


図1 GaAs-GaAsP歪み超格子フォトカソードの断面図

(SL pair : 超格子組数、 $L_{W,B}$: 井戸、障壁層厚)

これらの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重い正孔、軽い正孔準位の縮退分離 () が大きくできる。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モデルによる計算結果を表1に示す。サンプルは E_g が80meV以上と見積もられた。また、バンドギャップが大きいため ($E_g \sim 1.6\text{eV}$)、高い量子効率も同時に得られると期待される。

表1 バンドギャップ(E_g)と縮退の分離幅

	$E_g(\text{eV})$	(meV)
SLSP-1	1.62	83
SLSP-2	1.61	94
SLSP-3	1.62	83

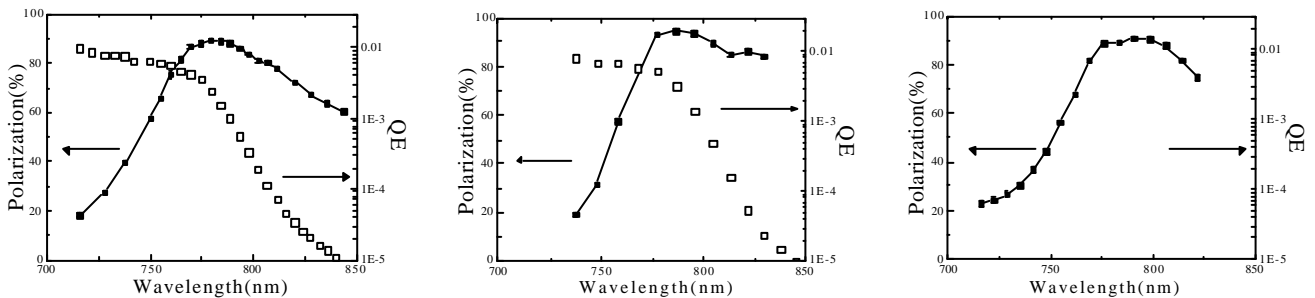


図2 GaAs-GaAsP歪み超格子フォトカソードから引き出した偏極電子ビームの偏極度と量子効率のレーザー波長依存性

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桁大きい値に選び、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 $1.5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ と表面高ドープ層より低い値に選んだ。本サンプルは名古屋大学大学院工学研究科のMOCVD装置を用いて作製した。

3. 実験結果と考察

3.1 偏極度と量子効率

フォトカソードの基本特性である偏極度と量子効率の測定結果を表2に、SLSP-3の偏極度、量子効率の励起波長依存のグラフを図2に示す。全てのサンプルで偏極度 $\sim 90\%$ 、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。特に、分離幅が最も大きいと期待できるSLSP2で、サンプル中で最も高い偏極度が得られた。また、SLSP3は超格子の組数が他のサンプルの2倍であるにもかかわらず高い偏極度で、最も高い量子効率を得た。

表2 最大偏極度になる励起レーザー波長での偏極度と量子効率

	偏極度 (%)	量子効率 (%)	励起レーザーエネルギー (eV)
SLSP-1	87	0.3	1.61
SLSP-2	92	0.5	1.59
SLSP-3	89	0.7	1.60

また、SLSP-1についてダブルバンチ電子ビーム生成実験では、NEA表面電荷制限が起こらずに空間電荷制限のビームの引き出しを達成した^[5]。更に、UVSOR BL5A (OKAZAKI, JAPAN)でSLSP-2を用いた放射光によるXPS実験でNEA表面電荷制限現象の原因となるSurface Photovoltage Effectの観測を行い、超格子フォトカソードに対してSurface Photovoltage Effectの強い抑制効果があることを確認した^[6]。

3.2 右巻き、左巻きスピ電子の量子効率

GaAs型フォトカソードでは、高い偏極度を得るために価電子帯での重い正孔、軽い正孔準位の縮退分離()は重要なパラメータとなる。そこで、偏極度、量子効率のデータを読み換え、右巻き、左巻きスピ電子の量子効率スペクトルを導出した。これらが重い正孔、軽い正孔準位からの励起電子スペクトルにほぼ対応していることを見出して、それぞれの量子効率スペクトルの立ち上がり励起エネルギーの間隔を見積ることとした。

図3にSLSP-2の右巻き、左巻きスピ電子の量子効率(QE_L 、 QE_R)とそれぞれの微分スペクトルを示す。SLSP-2は、バンド構造の計算結果から今回のサンプルの中で最も δ' が大きいと期待できる。微分スペクトルのピークから QE_L 、 QE_R の立ち上がりを見積った。それぞれの微分スペクトラムピークのエネルギー間隔は $\sim 60\text{meV}$ と大きく、 dQE_L/dE のピークでは、 dQE_R/dE との重なりが殆ど見られない。これは、重い正孔、軽い正孔準位が十分に分離しているためであると考えられる。

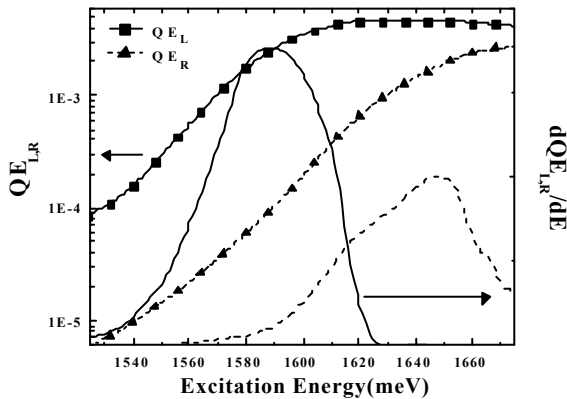


図3 SLSP-3から得られたUp-spin,Down-spin 電子の量子効率と微分スペクトラム

次に右巻き、左巻きスピ電子の量子効率の微分スペクトラムのそれぞれのピーク間隔を δ' とし、これまで開発したフォトカソードとGaAs-GaAsP歪み超格子テストサンプルの偏極度と δ' の相関を図4に示す。GaAs-GaAsP歪み超格子フォトカソードテストサンプルは他のフォトカソードに比べ δ' が大きく ($>45\text{meV}$)、85%以上の偏極度が期待できると考えられる。更に δ' と理論計算から出された δ の相関を室温エネルギー ($\sim 25\text{meV}$) 以上の δ を持つフォトカソードについて図5に示す。 δ は 40meV 付近から δ' との差が大きくなる傾向がある。この原因については更に考察を進めている。

4. まとめ

GaAs-GaAsP歪み超格子フォトカソードでのGLC計画が要求する偏極度、量子効率、バンチ電子ビーム

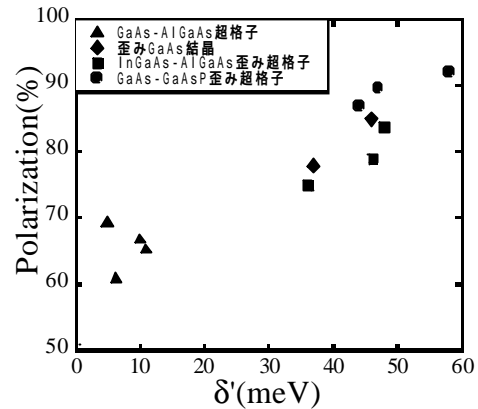


図4 偏極度と δ' の相関

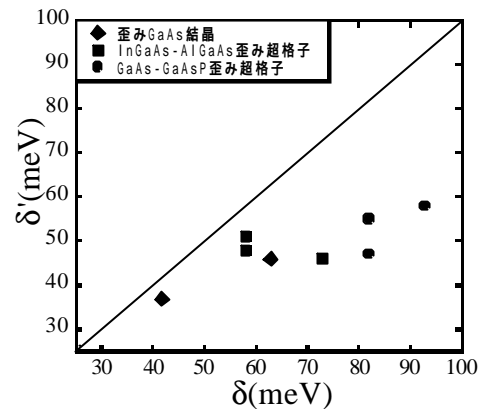


図5 δ' と δ の相関

生成の性能について試験を行った。

SLSP-2、SLSP-3のテストサンプルでこれまでにない高い偏極度 ($\sim 90\%$)、高い量子効率 ($>0.5\%$) を同時に達成できた。また、GaAs-GaAsP歪み超格子フォトカソードはsurface photovoltage effect現象の抑制が強く、NEA表面電荷制限現象のないダブルバンチ電子ビーム生成を達成できることを確認した。

これらの成果から、GaAs-GaAsP歪み超格子フォトカソードが、リニアコライダーの要求を満たす有望な偏極電子源結晶であることが実証された。

参考文献

- [1] GLC group, GLC Project Report (2003) 139
- [2] T. Nakanishi et al., 7th Polarized Gas Targets and Polarized Beams, AIP. Conf. Proc. 421 (1997) 300
- [3] K. Togawa, et al., Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Res. A414 (1998) 431
- [4] Y. Kurihara, et al., Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Res. A313 (1992) 393
- [5] K. Togawa, et al., Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan (July 12-14, 2000, Himeji, Japan) [12P-09]
- [6] S. Tanaka, et al., Submitted to J. Appl. Phys.