

Development of High Brightness Spin Polarized Electron Source

Makoto Kuwahara^{1,A)}, Tsutomu Nakanishi^{A)}, Shoji Okumi^{A)}, Masahiro Yamamoto^{A)}, Masaharu Miyamoto^{A)}, Naoto Yamamoto^{A)}, Ken-ichi Yasui^{A)}, Takanori Morino^{A)}, Ryosuke Sakai^{A)}, Kuniaki Tamagaki^{A)}, Koichi Yamaguchi^{B)}

^{A)} Department of Physics, Nagoya University, Furo, Chikusa, Nagoya, 464-8602, Japan

^{B)} Department of Electronic Engineering, The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan

Abstract

A high brightness spin polarized electron source is necessary for future linear collider project. We had already succeeded in development of the strained superlattice photocathode which could generate a high polarization and a multi-bunch structure beam. However, it seems that two major problems still remained, those are improvements of beam brightness and NEA lifetime under gun operations with high average current, respectively. In order to overcome these problems simultaneously, we started development of pyramidal shape GaAs that electrons can be emitted from a small area at the top of pyramid, and thus the beam brightness is expected to become higher, photocathode using field emission mechanism. Using the tip-GaAs, This emission mechanism also enables to extract electrons from the poor NEA or small PEA surface into vacuum, and it helps to relax the NEA lifetime problem. The electrical and the polarization characteristics were measured. The experimental results indicated that the highly spin polarized electron could be extracted from the conduction band into vacuum by field emission mechanism.

高輝度スピン偏極電子源の開発

1. はじめに

高輝度・低エミッタンスのスピン偏極電子源は次期リニアコライダー計画等にとって不可欠である。我々はすでにGaAs-GaAsP歪超格子フォトカソードの開発により高偏極度・高い量子効率、マルチバンチビーム生成等に成功している^{[1],[2]}。しかし、この偏極電子源用フォトカソードはNEA表面を必須とするために常に寿命問題を抱えており、超高真空の実現や電界放出暗電流の削減に最先端技術が求められる^[3]。また、高輝度化への課題も依然残されている。

そこで、NEA表面を必要としないフォトカソードの開発を開始した。それはニードル形状の先端微小領域から電界放出機構を利用してビームを取り出すものである。これにより、高輝度・低エミッタンス化も同時に実現することを目指す。

スピン偏極電子の生成は、GaAs系半導体フォトカソードに円偏光レーザーを照射し、特定のスピンの電子を選択的に価電子帯から伝導帯へ励起する機構を用いる。励起された電子は表面へ拡散し、真空中へと引き出される。そこで、本研究では、先の尖った形状のGaAsをまず試験することとした。ピラミッド状GaAsの先端への電界集中を利用し、伝導帯電子を真空中へと取り出すためである。ここでは、その電界放出特性および偏極度測定の結果について報告する。

2. 実験方法と結果

2.1. フォトカソード作成

本研究に使用したフォトカソード結晶は、異方性エッチングにより作成した。基板結晶 p-GaAs (Zn-dope $2 \times 10^{19}/\text{cm}^3$) の (100) 面に四角形のマスクパターンをフォトリソグラフィーにより [010]、[011] に沿って施した。その後、リン酸系溶液に浸し、エッチングを行い、Figure 1のようなピラミッド型のGaAs結晶を作成した^[4]。このうち、表面洗浄処理として、HCl飽和イソプロピルアルコールによりリンスした^[5]。その後、装置にインストールし、超高真空下で結晶の加熱洗浄 (550°C で1時間) を行い、結晶表面を清浄な状態にした。この方法によりフォトカソードの実験を行った。

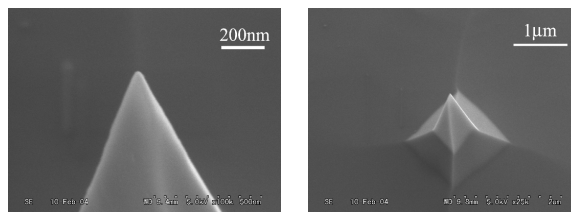


Figure 1: SEM images of pyramidal shape GaAs fabricated by anisotropic wet etching, (a) $\times 100\text{k}$, (b) $\times 25\text{k}$.

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

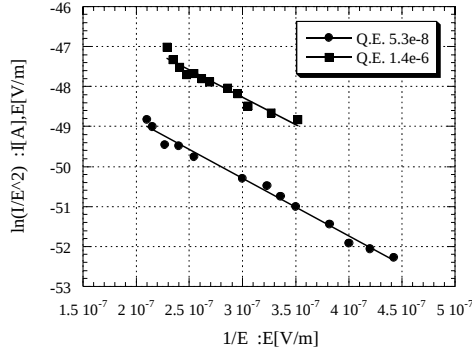


Figure 2: I-V characteristics of photo-current extracted from pyramidal shape GaAs. Emission current are plotted in the Fowler-Nordheim coordinates. The solid lines are the least-squares fit of the experimental data to the Fowler-Nordheim.

2.2. 実験装置

本実験では、70kV偏極電子源および20kV電子銃を用いて測定を行った^{[2],[6]}。20kV電子銃は、電極間距離を可変（5mm～25mm）にできる構造になっており、フォトカソード表面電界を最大で3.8MV/mにできるものである。また、真空槽は 10^{-9} Pa台の超真空度に保たれ、NEA表面を生成できる機構を有している。70kV偏極電子源は、70kV電子銃部分と偏極度測定系（Wien-Filter、Mott散乱測定装置）から成る装置である。また、本研究ではフォトカソードを円偏光励起するためにレーザーを使用した。実際の装置には、Ti:Sapphire-CWレーザーを用い、グラントムソンプリズムおよび $\lambda/4$ 波長版を用いて円偏光にした光をフォトカソードに照射するシステムとなっている。

2.3. 電流-電圧特性

ピラミッド状GaAs結晶の電流-電圧（I-V）特性を調べた。測定には20kV電子銃を用い、レーザー照射時の放出電子を観測した。Csを表面に添加しない条件では、最大印加電圧時においても十分なフォトエミッションが得られなかった。このためCsを添加し、真空レベルをPEAの状態ではあるが、伝導帯の底近くまで引き下げた。実験結果をFigure 2に示す。この図は、量子効率（Q.E.）の違う二つのサンプルに対する実験から得られたI-V特性をFowler-Nordheim（F-N）プロットにしたものである^[7]。いずれのサンプルにおいても高電界印加の下では、F-Nプロットにおいて右下がりの直線にのる結果を得た。この結果は光電流が電界放出により引き出されていることを示している。また傾きがほぼ一致しているのは、形状からくる電界増倍係数が同じであるためと推測される。

つぎに、高電界下での量子効率の励起波長依存性について測定した。測定は、gap=5.34mm, 20kV印加で得られた高電界（約2.9MV/m）をサンプルにかけ、照射するレーザー波長を変化させていった時の量子

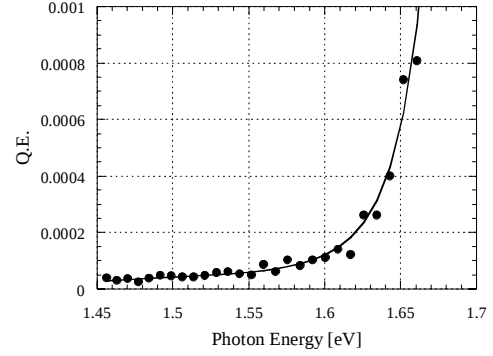


Figure 3: Q.E. of pyramidal shape GaAs under high gradient field (2.9MV/m) as a function of excitation photon energy. The inset shows a fit of the experimental data by the tunnelling yield calculated using WKB approximation.

効率を測定した。Figure 3は横軸に励起光子エネルギーをとり、縦軸には量子効率をとったものである。測定結果の特徴は1.6eV付近にある量子効率の急激な立ち上がりである。この変化は通常の低電界下でのNEAやPEA表面状態では観測されないの、励起電子が真空障壁を越えた事による増加ではなく、トンネル効果によるものと推測される。図の実線はWKB近似により求めたトンネル確率関数でデータをフィットしたものである。

2.4. スピン偏極度

次に、円偏光レーザー励起したピラミッド状GaAsから放出された電子の偏極度測定実験を行った。実験には70kV偏極電子源を用い、PEA状態の表面に高電界を印加した状態でのスピン偏極度を測定した。また、同時に量子効率の波長依存性も測定した。その結果をFigure 4に示す。図は横軸に励起波長、縦軸に偏極度（左軸）と量子効率（右軸）をとったものである。偏極度は、20%から40%の間であり、電界放出機構によってもスピン減偏極していない電子を真空中へ取り出せることを証明した。また、通常のNEA-GaAsの偏極度と比較しても、むしろ、短波長側では電界放出機構を利用したほうが高い偏極度が得られた。この違いは770nm（～1.6eV）付近より起こっており、それと同期するようにQ.E.の傾きも変化している。このエネルギー値はFigure 3に示したデータの急峻な立ち上がりと同じである。

3. 議論

得られたI-V特性とQ.E.- λ 特性の相互関係について述べる。Figure 2の近似曲線の傾きより求められる電子親和度 χ は、Fowler-Nordheimの式

$$J = 1.54 \times 10^{-6} \frac{E^2}{\chi} \exp \left(-6.87 \times 10^7 \frac{\chi^{3/2}}{E} \right), \quad (1)$$

より、電界増倍係数 β を用いて $\chi = 1.59 \times 10^{-2} \times \beta^{2/3}$ と表される。ここで、ニードルの先端曲率50nm、ニードル間隔を200 μ mとしたときの電界増倍係数

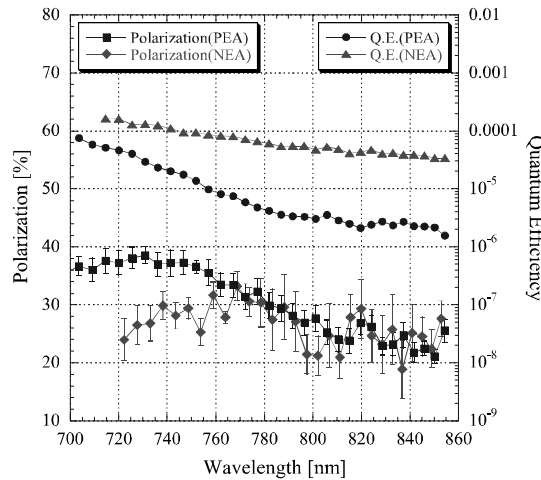


Figure 4: ESP and QE of pyramidal shape GaAs (PEA and NEA) as a function of wavelength.

β は電界計算コードPOISSONにより計算すると51となる。ただし、電界計算には半導体表面への電界しみ込みは考慮していない。これより $\chi = 0.226[\text{eV}]$ が得られる。次にFigure 3は量子効率の波長依存性のデータにおけるWKB近似式による透過確率は

$$T(\varepsilon_z) \propto \exp \left[-\frac{4\sqrt{2m}}{3\hbar e E} (\chi - \varepsilon_z)^{3/2} \right], \quad (2)$$

である。ここで、300KにおけるGaAsのバンドギャップエネルギー $E_g = 1.428[\text{eV}]$ を用いると、 χ の値は $\chi = 1.710 - 1.428 = 0.282[\text{eV}]$ である。F-Nプロットと量子効率の波長依存性より求めた電子親和度の値は、よく一致しており、トンネル電流説を支持していることが分かる。

次に、電界放出時のスピン偏極度の振る舞いは、NEA状態のそれとは違っていることが分かった (Figure 5)。励起した電子が表面に拡散する過程において、一部の電子はフォノン等に散乱されながら輸送され、スピンフリップ (減偏極) は、この散乱過程において起こると言われている^{[8],[9]}。よって、伝導帯の底に励起された場合にはあまり散乱を受けずに表面に到達するので、この場合は減偏極効果が少ない。しかし、伝導帯底よりも高く励起された電子は、輸送過程において散乱を受け、表面に到達した電子のエネルギー幅は広くなり、その中の低エネルギー部分 (散乱された電子) は低いスピン偏極度になっていると考えられる。トンネル効果は式(2)より、透過確率がエネルギーに対して急激に変化する。よって透過した電子はエネルギーの高い部分が大半を占めるようになる。このため偏極度の低い部分は削られ、高い部分のみが真空中へ取り出される。結果として高い偏極度が得られると考えられる。さらに、このことは取り出された電子群のエネルギー幅は小さくなり、初期エミッタンスが低減されることを示唆するものである^{[10],[11]}。

最後に、今回の手法は高い偏極度の電子ビームに有効である事を示したが、いくつかの限界もあることが分かった。実際に200nA以上電流引き出し (レ

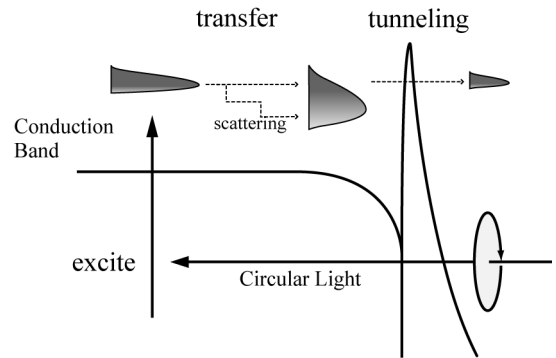


Figure5: Schematic model of the field emission mechanism from condition band of p-doped GaAs semiconductor. The upper part of energy distribution is considered to have higher polarization.

ーザー照射径 $\sim \phi 3\text{mm}$) のあと、ピラミッド先端が一部溶けて潰れるという現象が観測された。また今回の実験ではCsの付加により、真空準位を小さな値のPEA状態にしなければならなかった。これは、形状因子による電界増倍効果が不十分であることが原因であるが、通常 $\chi \sim 4\text{eV}$ の場合、電界放出電流の取り出しには1GV/m程度必要とされているから、300以上の増倍係数が必要である。これには、さらに鋭い形状のフォトカソード開発が必要と考えられる。しかしながら、今回の実験により使用したCs添加後十分時間を置いた時のPEA状態は、NEAに比べて非常に安定となることが判った。すなわち、寿命問題の緩和をはかる方法として実用的価値があると考えられる。

4. まとめ

本研究により、電界放出機構によるスピン偏極電子の引き出しが可能であることを証明した。それだけではなく、量子効率とスピン偏極度のスペクトルからも電界放出機構に特有な現象を観測し、PEA表面にフィルター効果があることを見出した。これらの結果は、新たなスピン電子源として加速器のみならず、電子顕微鏡などへの応用にも期待を持たせるものとなっている。

参考文献

- [1] T. Nishitani, et al., J. Appl. Phys. Vol. 97 (2005), 094907
- [2] K. Togawa, et al., Nucl. Instr. Meth. A455 (2000), 109.
- [3] F. Furuta, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 538 (2004), 33-44.
- [4] K. Yamaguchi and S. Tada, J. Electrochem. Soc., Vol.143, No.8 (1996) pp.2616-2619.
- [5] O. E. Tereshchenko, J. Vac. Sci. Technol. A 17(5).
- [6] M. Kuwahara, et al., Proceedings of the 20th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, Japan, 2003.
- [7] R. H. Fowler, L. Nordheim, Proc. Roy. Soc. A 119 (1928).
- [8] G. L. Bir, et al., Sov. Phys. JETP 42 (1975), 705
- [9] K. Zerrouati, et al., Phys. Rev. B37 (1988) 1334
- [10] K. Flottmann, et al., DESY-TESLA-FEL-97, 1997, 7pp.
- [11] S. Pastuszka, et al., J. Appl. Phys. 88(2000) 6788.