

歪み補償超格子構造を用いたスピン偏極電子源開発

POLARIZED ELECTRON SOURCE WITH STRAIN COMPENSATED SL STRUCTURES

山本尚人 ^{*A)}、金秀光 ^{*A)} 宮内智寛 ^{B)}、真野篤志 ^{C)}、山本将博 ^{*A)}、保坂将人 ^{C)}、高嶋圭史 ^{C)}、竹田美和 ^{D)}
N. Yamamoto^{*A)}, X.G. Jin^{A)}, T. Miyauchi^{B)}, A. Mano^{C)}, M. Yamamoto^{A)}, M. Hosaka^{C)}, Y. Takashima^{C)}, Y. Takeda^{D)}

^{A)}Accelerator Laboratory, Div. VII, KEK

^{B)}Graduate School of Engineering, Nagoya University

^{C)}NUSR, Nagoya University

^{D)}Advanced Science and Technology Foundation

Abstract

In order to improve the quantum efficiency (QE) of the NEA-GaAs based polarized electron source. GaAs/GaAsP strain-compensated superlattice (SL) samples with thickness up to 720 nm were fabricated and a electron spin polarization(ESP) of 92 % and QE of 1.6 % were simultaneously achieved at the pump laser energy of 1.59 eV for the 196 nm thickness sample. Furthermore, as results of the spinresolved analyses, the slightly degradation of the crystalline quality for thicker thickness samples were indicated, but the degradation rate was low and the effect for the beam performance was not observed. Then it is confirmed that the ESP is limited by the spin relaxation time during electron transport in the semiconductor for the thicker strain-compensated SLs.

1. はじめに

高いスピン偏極度を備えた高強度の電子ビーム生成は高エネルギー素粒子実験(電子・陽電子リニアコライダー^[1]、電子・イオンコライダー^[2])において必要不可欠であるとともに、近年は TEM^[3] や SPLEEM^[3] 等の電子顕微鏡のソースとしても応用がすすんでいる。

我々はこれら応用実験の要求に応える高性能な電子源開発を行っている。スピン偏極電子ビームの生成には従来 GaAs 系半導体を用いた歪み超格子薄膜と呼ばれるフォトカソード電子源が用いられている^{[4][5]}。本フォトカソードは高いスピン偏極度を実現しているが量子効率が低く大電流生成には向いていない。そこで、我々は新たに歪み補償超格子型フォトカソードを開発した^[5]。新たなフォトカソードではこれまでの研究により、量子効率において従来の3倍となる1.6%をスピン偏極度90%以上を維持しつつ実現している^[6]。

本発表では新たな歪み補償超格子フォトカソードについて説明する。

2. 歪み補償超格子

従来の GaAs/GaAsP 歪み超格子薄膜型フォトカソードでは、基板上に設けたバッファ層に歪み GaAs 層と歪みのない GaAsP 層を交互に成長させること(超格子構造)で製作される。GaAs 系半導体において高いスピン偏極度を実現するためには、GaAs の価電子帯最上端に存在するエネルギーバンドの縮退を解く必要があり、歪み及び超格子構造はこの目的で導入される。歪みポテンシャルや超格子構造による閉じ込め効果により、上述したエネルギーバンド内に存在する電子の有効質量は全角運動量応じた差が生じ、結果としてバンド分離が引き起こされるのである。引き起こされるバンド分離は、歪みポテンシャルによる寄与の方が超格子構造よりも大きい超格子構造は大電流生成時に半導体界面に引き起こされる表面起電力効果を緩和する効果もあるため、従来のスピン偏極電子源では歪み・超格子の両方が導入

されている。偏極度90%を越えるスピン偏極電子生成に必要なバンド分離幅は経験的に70meV程度といわれている。

しかし、半導体に導入される歪みは結晶性を劣化されるという欠点もある。結晶中に導入された歪みポテンシャルは結晶成長において欠陥や転位を引き起こすのである。歪みポテンシャルによる臨界膜厚に関する詳細な考察は過去に Matthews^[7] らによってなされている。実際、GaAs/GaAsP 歪み超格子薄膜結晶ではこの問題のため、超格子膜厚として120nm程度が限界であること^[8]、超格子構造に変調を引き起こすこと^[9]などが報告されている。また、結晶性劣化は量子効率の低下やエミッタンスの劣化にも繋がると予測される。

このような問題を打開するため我々は新たに歪み補償超格子構造をスピン偏極フォトカソードに適用することを試みた。歪み補償とは従来、歪み GaAs 層と歪みのない GaAsP 層で構成されていた超格子層のうち、GaAsP 層に GaAs 層とほぼ同量、ただし方向を反転させた歪みを導入するというアイデアである。こうすることで、超格子一層毎に歪みポテンシャルは補償されるため、歪みが蓄積されることなく良質な結晶性が期待されるのである。

3. 歪み補償超格子フォトカソード

図1に実際に作製した GaAs/GaAsP 歪み補償超格子フォトカソードの模式図を示す。フォトカソード設計は従来の GaAs/GaAsP 歪み超格子薄膜をベースとしてバッファ層を AlGaAsP に変更した。Al_{0.1}Ga_{0.9}As_{0.81}P_{0.19} は格子定数が超格子層を構成する GaAs と GaAs_{0.62}P_{0.38} のほぼ中間であるため、各超格子層にほぼ同等かつ逆方向の歪みポテンシャルが導入できる。さらに、バッファ層と基板の GaP 層はバンドギャップが超格子層よりも高いため透過型フォトカソードとしての使用も可能である。

結晶は名古屋大学にある MOVPE 装置を用いて、12,24,36そして90組の超格子層を持つ結晶を製作した。超格子層の厚さは一組で8(4+4)nmである。これら

*naoto@nagoya-u.jp

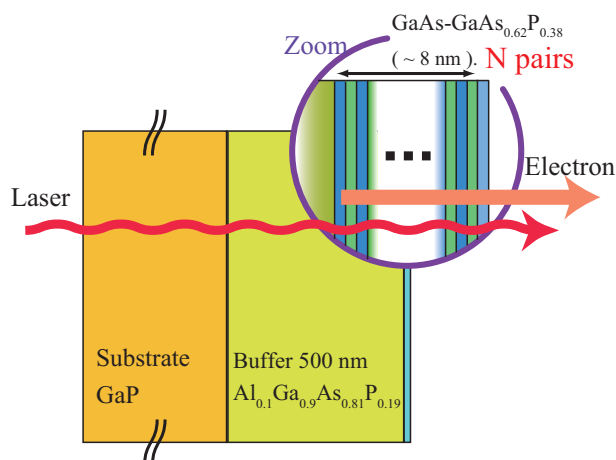


Figure 1: Schematic of GaAs/GaAsP strain-compensated SL samples.

Table 1: Design Parameta of Photocathode Samples

Parameter	value
バンドギャップエネルギー	1.54 eV
伝導帯ミニバンド幅	29 meV
価電子帯 重い正孔バンド幅	1 meV 以下
価電子帯 軽い正孔バンド幅	29 meV
価電子帯 バンド分離幅	75 meV

歪み補償超格子フォトカソードの設計パラメータを表.1にまとめる。

4. 実験結果

製作した歪み補償超格子サンプルは名古屋大学及びKEKで性能評価を行った。スピン偏極度は名古屋大学のモット検出器^[10]を用いて測定し、量子効率も名古屋大学及びKEKにおいて評価を行った。名古屋大学の装置では表面クリーニングは熱処理のみであり、KEKでは熱処理に加え原子状水素クリーニングを施した。量子効率はCsとO₂によるNEA成膜後、約-100Vの電圧を超格子サンプルに印加し測定した。フォトカソード励起光用はCWの波長可変Ti:Sapphireレーザーを用いた。各波長における励起光のバンド幅は1nA以下である。

図.2に各サンプルの最大スピン偏極度と同じ励起光波長での量子効率を示す。横軸は超格子膜厚とした。図中、スピン偏極度は赤丸で示し、量子効率は熱処理(HC)のみのものを青三角、原子状水素クリーニング(AHC)を施したものを青四角で右軸に示した。測定の結果、スピン偏極度は約300nm厚までにおいて90%を保ち、その後徐々に低下して行くことが観測された。量子効率においては約500nm厚のサンプルまでにおいて、膜厚に比例して増加している。また、原子状水素クリーニングの結果、量子効率が大きく改善することが確認できた。

これまでの測定の結果、今回製作したフォトカソードサンプルのうち、超格子24組(厚さ196nm)のサンプルにおいて最高性能(スピン偏極度92図.2から、さらに膜厚の厚いサンプルに原子状水素クリーニングを施

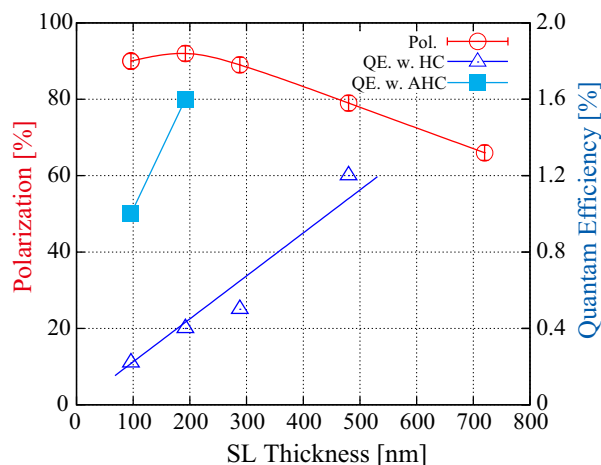


Figure 2: Thickness dependences of the polarization and the QE. The open circles represent the spin ESP. The squares and triangles represent the QE with and without atomic hydrogen cleaning treatment, respectively.

すことでさらなる性能向上が得られる可能性があるが、装置の故障のため今のところ評価できていない。

5. 考察

歪み補償による結晶性の変化を評価するため、各膜厚の超格子サンプルから得られたスピン偏極度の量子効率の励起光依存性をスピン分解し、フォトカソードパラメータを見積もった。本論文で行ったスピン分解解析の分解能は励起光エネルギーのステップ幅に依存しており、エネルギーとして約10meV程度となっている。

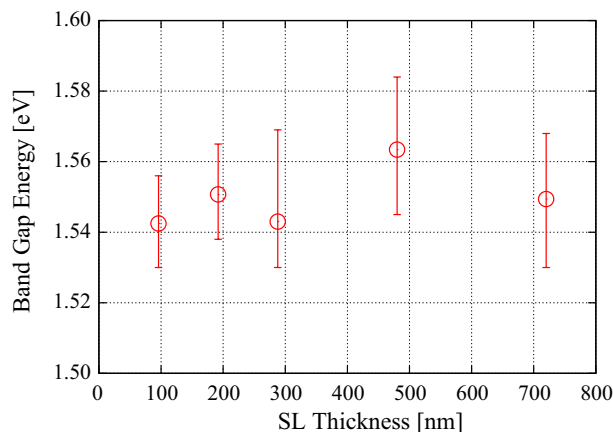


Figure 3: Band gap energy as a function of the SL thickness.

図.3にバンドギャップの超格子膜厚依存性を示す。バンドギャップは価電子帯の最上端に位置する重い正孔準位から伝導帯最下端ミニバンドまでのエネルギーを意味する。解析の結果、バンドギャップに有意な変化はみられなかった。

図.4に価電子帯バンド分離幅の超格子膜厚依存性を示す。バンド分離幅の設計値は表.1で示したように75meVであり、最も超格子膜厚の薄いサンプル(96nm)では

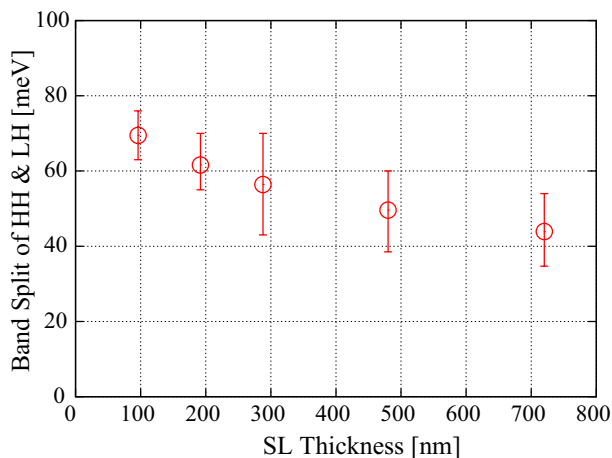


Figure 4: Band split values as a function of the SL thickness.

再現していることがわかるが、膜厚が増加するにつれて徐々に低下してきていることがわかる。バンド分離幅は最も厚いサンプル (720 nm) では約 50 meV まで下がってきている。これらの結果から今回作製した歪み補償超格子において歪みがわずかに残っており、十分に補償できていないことが予測される。しかし、その量は僅かであり、極端にスピン偏極電子源の性能を劣化させる程ではないと考えられる。

図2で示した厚さ 300 nm 以上でみられたスピン偏極度の低下はバンドスプリット幅の減少のみでは説明できない。本測定で使用した励起光は中心波長約 780 nm に対しバンド幅 1 nA 以下であり、スピン偏極電子の励起を考えると約 50 meV のバンドスプリット幅でも十分であると予測されるからである。また、歪み補償超格子サンプルで測定された半導体中でのスピン緩和時間は約 140 ps であり^[5]、この値を用いると図2で観測されたスピン偏極度の傾向が説明できることがわかっている。つまり、いずれのサンプルにおいても半導体内で励起された電子の偏極度は 90% を越えているが、半導体中を拡散する際に減偏極が生じていると考えられる。スピン緩和時間は主に半導体の材料に依存すると考えられるため、今回測定された減偏極の傾向は GaAs 系半導体のスピン偏極電子源としての限界を示すものだと考えられる。

6. まとめ

新たに GaAs/GaAsP 歪み補償超格子フォトカソードを製作し、従来のスピン偏極電子源性能を向上させることに成功した。現在までに超格子 24 組 (196 nm 厚) のサンプルにおいて、スピン偏極度 92 %, 量子効率 1.6% を達成しており、スピン偏極度を維持したまま量子効率として従来の 3 倍の値を実現している。今後、より膜厚の厚い超格子サンプルについても原子状水素クリーニングを含めた量子効率の最適化を行って行く予定である。

さらに、本研究では歪み補償超格子構造を用いる事で、従来成膜できなかった肉厚の超格子サンプルを得る事に成功し、スピン緩和時間によりスピン偏極電子源の性能が制限されることが確認できた。これは実効的に超格子層を厚くすることで得られる量子効率改善の限界

を示す結果であり、今後のフォトカソード開発において重要な実証となる。

7. 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科学研究費補助金 (23246003,25390066) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Ilc technical design report, see, <https://www.linearcollider.org/ilc/publications/technical-design-report>.
- [2] BNL press release on EIC collaboration, <http://www.bnl.gov/rhic/news2/news.asp?a=2870&t=today>
- [3] M. Suzuki, M. Hashimoto, T. Yasue, T. Koshikawa, Y. Nakagawa, T. Konomi, A. Mano, N. Yamamoto, M. Kuwahara, M. Yamamoto, et al. Real time magnetic imaging by spin-polarized low energy electron microscopy with highly spin-polarized and high brightness electron gun. *Applied Physics Express*, 3:026601, 2010.
- [4] T. Nishitani, T. Nakanishi, M. Yamamoto, S. Okumi, F. Furuta, M. Miyamoto, M. Kuwahara, N. Yamamoto, K. Naniwa, O. Watanabe, Y. Takeda, H. Kobayakawa, Y. Takashima, H. Horinaka, T. Matsuyama, K. Togawa, T. Saka, M. Tawada, T. Omori, Y. Kurihara, M. Yoshioka, T. Kato, and T. Baba. Highly polarized electrons from gas-gasp and ingaas-algaas strained-layer superlattice photocathodes. *Journal of Applied Physics*, 97(9):94907–94907, 2005.
- [5] Xiuguang Jin, Atsushi Mano, Fumiaki Ichihashi, Naoto Yamamoto, and Yoshikazu Takeda. High-performance spin-polarized photocathodes using a gaas/gasp strain-compensated superlattice. *Applied Physics Express*, 6(1):015801, 2013.
- [6] Xiuguang Jin, Burak Ozdol, Masahiro Yamamoto, Atsushi Mano, Naoto Yamamoto, and Yoshikazu Takeda. Effect of crystal quality on performance of spin-polarized photocathode. *Applied Physics Letters*, 105(20):203509, 2014.
- [7] J.W. Matthews and A.E. Blakeslee. Defects in epitaxial multilayers: I. misfit dislocations. *Journal of Crystal Growth*, 27:118 – 125, 1974.
- [8] T. Maruyama, D.-A. Luh, A. Brachmann, J. E. Clendenin, E. L. Garwin, S. Harvey, J. Jiang, R. E. Kirby, C. Y. Prescott, R. Prepost, and A. M. Moy. Systematic study of polarized electron emission from strained gaas/gasp superlattice photocathodes. *Applied Physics Letters*, 85(13):2640–2642, 2004.
- [9] Xiuguang Jin, Yuya Maeda, Toshio Sasaki, Shigeo Arai, Yoichi Ishida, Masataka Kanda, Shingo Fuchi, Toru Ujihara, Takashi Saka, and Yoshikazu Takeda. Effects of defects and local thickness modulation on spin-polarization in photocathodes based on gaas/gasp strained superlattices. *Journal of Applied Physics*, 108(9):094509, 2010.
- [10] T. Nakanishi, K. Dohmae, S. Fukui, Y. Hayashi, I. Hirose, N. Horinaka, T. Ikoma, Y. Kamiya, M. Kurashina, and S. Okumi. Construction of gaas spin-polarized electron source and measurements of electron polarization. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 25:766–767, 1986.