

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21740175

研究課題名(和文) 二光子励起型フォトカソード電子源による高スピン偏極度電子ビーム生成

研究課題名(英文) Generation of highly spin-polarized electron beams by using two-photon excitation process from GaAs semiconductors.

研究代表者：

山本 尚人 (YAMAMOTO NAOTO)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：60377918

研究成果の概要(和文)：波長1560nmのレーザーを用いたGaAs型半導体からの電子ビーム生成に関する調査の結果、レーザーピーク強度が十分に得られず二光子励起過程に依存する量子効率が小さい場合、予測されるスピン偏極度90%以上に対し20%程度のスピン偏極度しか得られないことがわかった。これは半導体内での減偏極に加え、レーザー自体に含まれる高調波成分とGaAs型半導体内の不純物準位を起源とした電子放出が関与していると考えられる。前者については活性層の厚さを薄くすることで、後者2つの効果はレーザー強度をさらに高め二光子励起過程の成分が支配的になるようにすることである程度は解決できると考えられるが、従来の90%を越えるスピン偏極度を得るためにはこれらの問題を本質的に解決することも重要となる。

研究成果の概要(英文)：In case that the laser power was around the threshold power of two photon excitation from GaAs semiconductors, it is found that the measured electron spin polarization (ESP) was only around 20%, which is much lower than estimated value, which is higher than 90%. It is considered that the ESP degradation is caused by the exists of harmonics in excitation laser and impurity energy states in GaAs semiconductors. To obtain higher than 90 % ESP, we have to make more complicate researches & developments for laser system and sample preparation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：加速器、電子源

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：加速器、スピン偏極電子源、ビーム物理、半導体

1. 研究開始当初の背景

(1) 価電子帯において縮退の解けていないバルクのGaAs型半導体にバンドギャップエネルギーとほぼ同じエネルギーを持つ円偏光レーザーを照射すると最大50%程度のスピン偏極電子ビームを得られるが、この際のレーザーエネルギーをバンドギャップエネルギーの半分に置き換え二光子励起過程を用いることで原理的には100%に近い偏極度を持つ電子ビームが得られることが名古屋大

学らのグループにおいて予測されていた。

名古屋大学・大阪府立大学のグループで行った予備実験(フォトルミネッセンスを用いた半導体内部での励起電子状態の観察)では、バルクGaAs半導体においてスピン偏極度95%以上の電子を伝導帯に励起できることが確認されていた。しかし、これらの偏極電子を実際に真空側に取り出しビームを生成すること。また、そのスピン偏極度がほぼ100%を達成していることはこれまで確かめられ

ていなかった。これはレーザーシステム及び装置の制限により、励起用レーザーの強度を十分に高くできないことが原因であった。

2. 研究の目的

GaAs 型半導体にバンドギャップエネルギーの半分のエネルギーを持つレーザーを照射することで、二光子励起過程による電子ビーム生成が可能であること、生成された電子ビームが高いスピン偏極度を兼ね備えていることを確かめることが目的であった。

具体的にはバルクの GaAs 型半導体に十分な強度の近赤外レーザーを照射することで、二光子励起過程に従う電子ビームを生成し、そのスピン偏極度が 50%以上であることを確認することが目的であった。さらに、このスピン偏極度を原理的な限界値である 100% に近づけるため、電子源等の改良を行う予定であった。

3. 研究の方法

(1) 電子源の改良

研究代表者が先に開発した高輝度電子源は波長約 800 nm 程度のレーザー径を半導体試料表面で従来よりも二桁程度小さい 1 ミクロン程度まで絞ることが可能であった。これが近赤外レーザーにも適用できれば、二光子励起過程を引き起こすに十分なレーザー強度が得られると予想された。

従って、まずは高輝度電子銃の光学系部分を近赤外領域のレーザーにも適用できるよう改造し、実際にレーザーの収束径が十分に絞れていることを確認する。

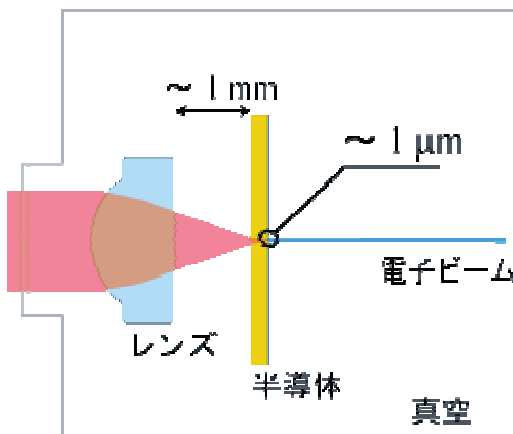


図 1.高輝度電子銃の模式図

半導体試料に対し電子ビームを生成すると逆側からレーザーを照射し、試料直前で収束することで、回折限界近い収束径を実現させる。

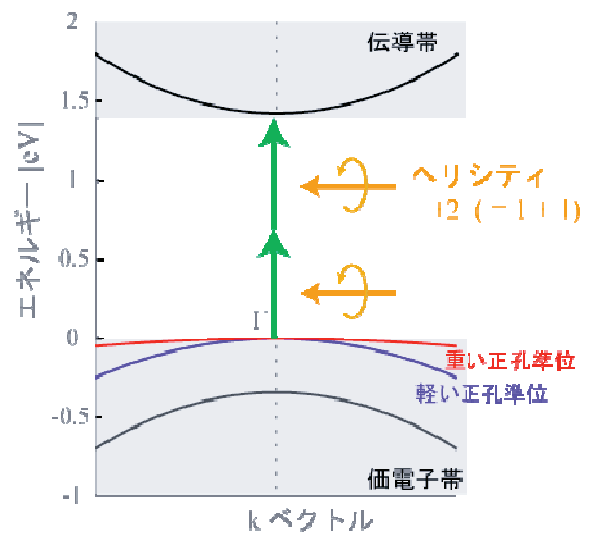


図 2.二光子励起過程による価電子帯から伝導帯への電子の遷移

軌道角運動量保存則によりヘリシティを保存した励起のみ許されるため伝導帯に励起されるスピンの方向が制限される。

(2) 二光子励起過程による電子線生成

二光子励起過程を実現させるためには時間的にも圧縮したレーザーが必要である。そこで、フェムト秒レーザーを用いて電子線生成試験を行う予定であった。またこのフェムト秒レーザーは一時借用して試験を行う予定であった。

(3) 電子線のスピン偏極度測定

二光子励起過程による電子線生成が成功した後は、モット散乱を用いたスピン偏極度測定装置まで電子線を導きスピン偏極度測定を行う予定であった。

(4) さらなる性能の向上

スピン偏極度及び生成電子線量の向上を目指し、装置及び半導体試料の改良を行う予定であった。

4. 研究成果

(1) 電子源の改良

既存の電子源の光学系改良を行った。具体的には偏光スプリッター、4 分の 1 波長板等を近赤外領域のレーザーに合わせて変更し、その動作確認を行った。動作確認は、本試験で用いるレーザーとほぼ同じ波長 (1560nm) で発振する CW の半導体レーザーを用いた。

(2) 二光子試験の結果と考察

諸事情により当初予定していたフェムト秒レーザーの借用が困難となった。そのため CW レザーを代用したが、二光子励起過程での電子線生成には十分な強度を得られな

った。このため、この状況で可能なより基礎的な実験を行うこととした。

また、同時期に同じく二光子励起過程の実験を行っていたアメリカ、ジェファーソン国立研究所 J.L. McCarter 氏と個人的な連絡をとり、情報の交換及び議論を行った。彼らは従来型の電子銃（図.3）を用いているため、極端なレーザー径の収束は不可能であったが大強度レーザーを用いて二光子励起過程を実現した。当初研究代表者が予定していたレーザーピーク強度は 10^{10} W/cm² であったのに対し、彼らの試験は 10^5 W/cm² 程度の領域で行われた。この値は二光子励起過程を実現できるぎりぎりの値であったと考えられる。

J.L. McCarter 氏らの結果（Journal of Physics: Conference Series により公開予定）は以下のようなものであった。波長 1560 nm のレーザーを用いた二光子励起過程による電子線の生成は確認できたが、そのスピン偏極度は予備実験等で予測されていた値を大きく下回り、16.8%であった。

この結果に対し、スピン偏極度が予測されていた値を大きくした下回った原因は、A) 励起電子の GaAs 半導体中拡散による減偏極、B) レーザーの高調波成分による効果、C) GaAs 型半導体の不純物準位による効果が考えられる。

このうち、A) については波長 1560nm のレーザーを用いた場合、半導体による吸収長が従来の約 800 nm の領域のものより長くなる。従って半導体試料の奥深くで励起された電子のスピンが表面に達し真空に放出されるまでに緩和してしまい、結果的に減偏極が起

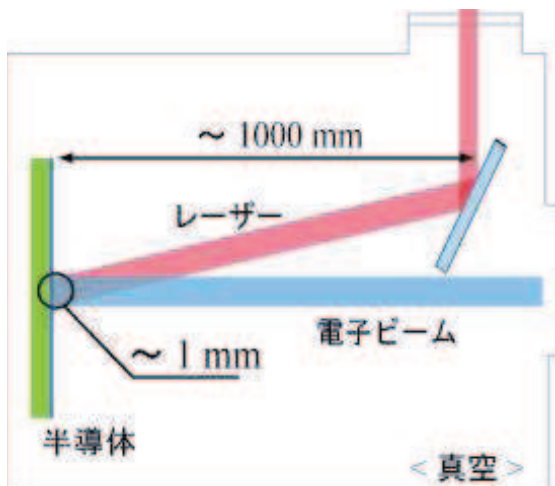


図 3. 従来型の電子銃

レーザを遠方から照射する必要があるため、半導体表面でのレーザー径は比較的大きなものとなる。

こるのである。

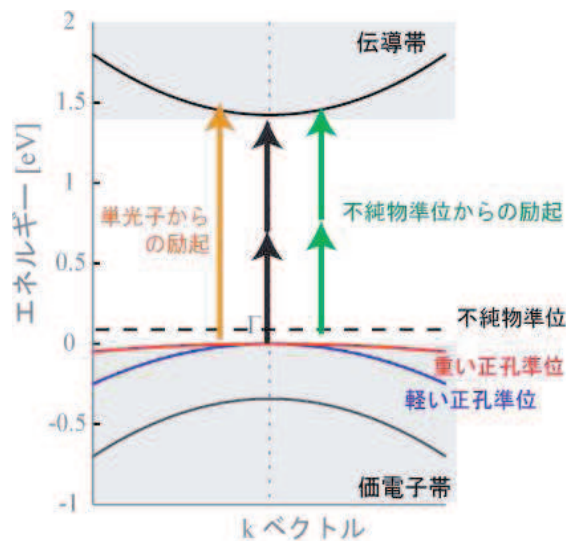


図 4. 二光子励起時の減偏極の要因
拡散中の減偏極以外にレーザー高調波や不純物による励起が考えられる。

次に B) についてレーザーの基本波は 1560 nm であるが、その発振過程によりわずかに高調波成分（1560nm の倍数の波長）を含んでしまう。二光子励起過程閾値領域の強度における二光子励起量子効率より単光子での量子効率よりも 7~8 桁以上低いため、わずかにでも高調波成分が残っていると、これによる電子励起過程が生じ減偏極につながってしまう。

最後に C) について、GaAs 型半導体を電子源に用いる場合、試料に P 型のドーピングを行う必要があり、これが不純物準位をつくることが知られている。このドーピング材による不純物準位は状態数が非常に少なく従来の単光子による偏極電子生成にはほとんど影響は与えないが、二光子励起過程の場合はこの準位からの励起も無視できないものになると予想される。

(3) 本研究で得られた知見と今後の方針

これらの結果・考察をもとに本研究代表者は A) から C) のうち、特に C), D) について注目し基礎的な調査を進めた。本研究代表者が目標としている二光子励起型スピン偏極電子源は背面透過光型という方式（図 1 参照）をとっており、電子が励起できる活性層は従来の電子源と比べ短く、長くても数百 nm であるため A) の効果はほとんど無視できるという利点を持つからである。

また、本研究期間における B), C) についての基礎研究の結果、B) については多重の波長フィルターを用いることでレーザーの高調波成分を除去できるのではないかと検討し

ている。ただし、このような光学素子を用いることはレーザーのパルス長（時間構造）を劣化させることになるため、実験においてはレーザーピーク強度の値との駆け引きなどより実務的な評価が必要だと考えられる。

次に C) においては GaAs 型半導体の種類の選択・設計に重要な知見となると考えられる。例えば、偏極電子源において P 型のドーピングは半導体内での電子伝導率の改善効果だけではなく、表面電荷制限効果（表面フォトルテージ効果とも呼ばれる）という電子の生成を抑制する効果を防ぐために必要不可欠であることが既にわかっており、従来の偏極電子源では限界近くまでそのドーピング量を増やしてきた。しかし、二光子励起型においてはその割合を最適化する必要があることを示唆している。また、P 型のドーピング材料の選択について、亜鉛を用いた場合は不純物準位のエネルギーレベルを低く抑えられることがわかっており有望であるが、さらにこれに変わる材料の調査も必要であると考えている。

(4) まとめ

以上が、本研究期間で得られた成果である。本研究においては十分なレーザー強度を得ることができず、単独での試験では満足した結果が得られなかった。しかし、研究代表者の計画していたのより少し低いピーク強度で行われた他研究所のデータから、研究代表者が将来予定する本試験へ向けての問題点が明らかになり、それらの項目について調査を進めることができた。

これらの知見は今後予定する試験において非常に重要なものであったと考える。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 5 件）

- ① N. Yamamoto, X.G. Jin, A. Mano, M. Suzuki, M. Hashimoto, T. Yasue, T. Koshikawa, T. Ujihara, Y. Takeda, T. Ohshima, T. Saka, T. Kato, H. Horinaka,
- ② S. Okumi, and T. Nakanishi, "Status of the high brightness polarized electron source and experimental result as a Spin-LEEM electron source", Proceedings of SPIN 2010, Journal of Physics: Conference Series, accepted, 査読有り
- ③ T. Saka, Y. Ishida, M. Kanda, X.G. Jin, Y. Maeda, S. Fuchi, T. Ujihara, Y. Takeda, T. Matsuyama, H. Horinaka, T. Kato, N. Yamamoto, A. Mano, Y.

Nakagawa, M. Kuwahara, S. Okumi, T. Nakanishi, M. Yamamoto, T. Ohshima, T. Kohashi, M. Suzuki, M. Hashimoto, T. Yasue and T. Koshikawa, "Strain of GaAs/GaAsP Superlattices Used as Spin-Polarized Electron Photocathodes, Determined by X-Ray Diffraction", e-Journal of Surface Science and Nanotechnology, 8, pp:125--130 (2010), 査読有り

- ④ M. Suzuki, M. Hashimoto, T. Yasue, T. Koshikawa, Y. Nakagawa, A. Mano, N. Yamamoto, M. Yamamoto, T. Konomi, M. Kuwahara, S. Okumi, T. Nakanishi, X.G. Jin, T. Ujihara, Y. Takeda, T. Kohashi, T. Ohshima, T. Saka, T. Kato, H. Horinaka, "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), 査読有り
- ⑤ N. Yamamoto, X.G. Jin, A. Mano, Y. Nakagawa, T. Nakanishi, T. Ujihara, S. Okumi, M. Yamamoto, T. Konomi, Y. Takeda, T. Ohshima, T. Saka, T. Kato, H. Horinaka, T. Yasue and T. Koshikawa, "High Brightness and high polarization electron source using transmission photocathode", Proceedings of SPIN 2008, AIP, 1052-1056 (2009), 査読無し

〔学会発表〕（計 10 件）

- ① M. Suzuki, "Real time observation of growth process of magnetic thin films by SPLEEM with high brightness and high spin-polarized electron source", 7th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices (ALC'09), 2010/10/06, 米国
- ② N. Yamamoto, "Status of the high brightness polarized electron source and experimental result as a Spin-LEEM electron source", Workshop on Sources of Polarized Electrons and High Brightness Electron Beams, 2010/09/23, ドイツ
- ③ 市橋史朗, "AlGaAs 中間層の導入による透過型 GaAs/GaAsP 歪み超格子スピン偏極フォトカソードの高量子効率化", 第 71 回応用物理学会学術講演会, 2010/09/14, 長崎大学
- ④ 金秀光, "超高輝度・高スピン偏極度フォトカソード", 2009 年秋 第 70 回応用

物理学会学術講演会, 2009/09/11, 富山
大学

[その他]

ホームページ等

<http://kenpro.mynu.jp:8001/Profiles/0058/0005837/profile.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 尚人 (YAMAMOTO NAOTO)
名古屋大学・工学研究科・助教
研究者番号: 60377918

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし