

令和 4 年 5 月 25 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05313

研究課題名(和文) 半導体量子構造による円偏光の高偏極長スピン寿命電子への変換

研究課題名(英文) Conversion of circularly polarized light to highly polarized long spin-lived electrons by semiconductor quantum structure

研究代表者

竹内 淳 (Takeuchi, Atsushi)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：80298140

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：光励起によるスピン偏極率の向上と長寿命化を図るために、GaAs量子井戸の隣にAlGaAsバリア層を介してタイプII型AlAs量子井戸を積層したタイプII型トンネル双量子井戸のトンネル時間とスピン緩和時間を測定した。その結果、バリア層が異なるとスピン緩和時間の励起光強度依存性が異なることが明らかになった。また、III-V族化合物半導体のスピン緩和の知見を広げ長時間化をはかるためにGaAs/AlGaAs量子井戸のスピン緩和の井戸幅依存性、GaSb/AlSb多重量子井戸のスピン緩和、低温成長GaAsのスピン緩和の成長温度依存性、Beドープp型GaAsのスピン緩和のドーピング濃度依存性を調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

半導体中のスピンの自由度を利用すれば従来のエレクトロニクスでは実現できなかった新しい機能をデバイスに付加できる。特に円偏光から長寿命のスピン偏極電子への高効率の変換の実現は、新たな光スピントロニクスデバイスの開発やスピントランジスタ等の動作実証に重要である。タイプII型トンネル双量子井戸において、バリア層を薄くしトンネル時間を速くすると、スピン緩和機構が抑制されてスピン緩和時間が長くなることが明らかになったことと、GaAs/AlGaAs量子井戸のスピン緩和時間の井戸幅依存性を調べて、井戸幅1.8 nmで400psの長いスピン緩和時間が得られたことは応用上の意義が大きい。

研究成果の概要(英文)：The tunnelling time and spin relaxation time of type II tunnel bi-quantum (TBQ) wells which consist of type II AlAs quantum well, AlGaAs barrier layer and GaAs quantum well were investigated. The TBQ structure is expected to improve the spin polarization rate and extend the spin relaxation time. As a result, the excitation power dependence of the spin relaxation time is shown to differ depending on the barrier layer. In addition, to select the desired III-V compound semiconductors, the spin relaxation time of GaSb /AlSb multiple quantum wells, the well width dependence of spin relaxation time of GaAs/AlGaAs quantum wells, the growth temperature dependence of spin relaxation time of low-temperature-grown GaAs, and the doping concentration dependence of spin relaxation time of Be-doped p-type GaAs were investigated.

研究分野：半導体量子構造で起こる超高速現象の解明と応用

キーワード：半導体量子構造 スピントロニクス 化合物半導体 スピン緩和 時間分解測定

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光スピントロニクスデバイスの実現においては、「円偏光」を「高いスピン偏極率を有しかつ長いスピン緩和時間(寿命)を持つスピン偏極電子」に高効率で変換することが強く期待されている。しかし、そのような機能を有する半導体量子構造はまだ実現されていない。また、スピントランジスタ等の半導体スピントロニクスデバイスの動作実証には高いスピン偏極率を持つスピン電子注入源が必要であるがそのようなスピン電子注入源も未だ存在しない。このため、スピントロニクスデバイスの実動作の研究においては、極めて低いスピン偏極率の電子を用いて限定的な原理実験を試みる段階に留まっている。

一方、円偏光を半導体量子構造に照射することによってスピン偏極電子を生成し、これに電界を印加して真空中に取り出すスピン偏極電子源が開発されている。この種のスピン偏極電子源は透過型電子顕微鏡等の電子源としてすでに実用に供されており、III-V 族化合物半導体の歪量子井戸構造を用いてすでに 90%を超える高いスピン偏極率が実現されている。したがって、円偏光を高いスピン偏極率を持つ電子に変換する半導体量子構造と一体化させれば、新規な光スピントロニクスデバイスが実現されるとともに、スピントランジスタの動作実証も可能になると考えられる。

2. 研究の目的

これまでのスピン偏極電子源では、生成されたスピン偏極電子をすぐに真空中に取り出すので高いスピン偏極率をそのまま維持できるが、半導体中でのスピン緩和時間は数百ピコ秒以下で短いという問題がある。したがって、半導体デバイス中でスピン偏極電子を注入するには、スピン緩和時間を引き延ばし高いスピン偏極率を維持したまま移動させることが課題となる。この高いスピン偏極率と長いスピン緩和時間を整合性よく実現できる解を見つけることが本研究課題の目的である。

3. 研究の方法

本研究は、半導体量子構造を用いて「円偏光」を「高いスピン偏極率で長スピン寿命のスピン偏極電子」に変換し半導体中に注入することを目的とする。このために円偏光を高いスピン偏極率を有する電子に変換する半導体量子構造と、スピン偏極した電子を長いスピン緩和時間のまま半導体中に注入する半導体量子構造を組み合わせることに特徴がある。この半導体量子構造の実現によって、新規な光スピントロニクスデバイスの開発とスピントランジスタ等のスピントロニクスデバイスの動作の実証研究が可能になるという学術的独自性があり、応用上のインパクトも大きい。

本提案の円偏光をスピン偏極電子に変換する半導体量子構造は、円偏光励起によって高いスピン偏極率の電子を生成する「高スピン偏極量子井戸」と、生成された高スピン偏極電子を高いスピン偏極率を維持したまま電界下で移動させる「長スピン寿命量子井戸」からなる。高スピン偏極半導体量子井戸においては、スピン偏極率 100%に迫るスピン偏極電子の生成を目標とし、長スピン寿命半導体量子井戸ではデバイス動作に必要な 1 ns を超えるスピン緩和時間の実現を目標とする。

4. 研究成果

光励起によるスピン偏極率の向上と長寿命化を図るために、図 1 のように GaAs 量子井戸の隣に AlGaAs バリア層を介してタイプ II 型 AlAs 量子井戸を積層したタイプ II 型トンネル双量子井戸のトンネル時間とスピン緩和時間を測定した。その結果、バリア層を薄くしトンネル時間を速くすると、スピン緩和機構が抑制されて、図 2 のように励起光強度を上げてもスピン緩和時間が長くなることが明らかになった。

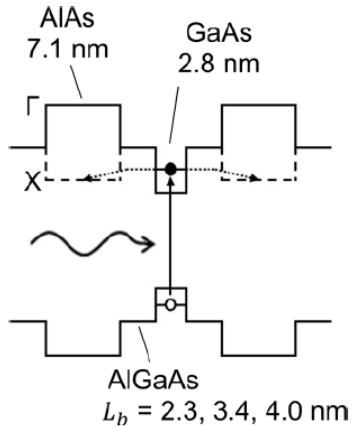


図1．タイプ II 型トンネル双量子井戸

GaAs 量子井戸に光励起された電子は、AlGaAs 層を量子力学的にトンネルしてタイプ II 型の AlAs 層に到達する。

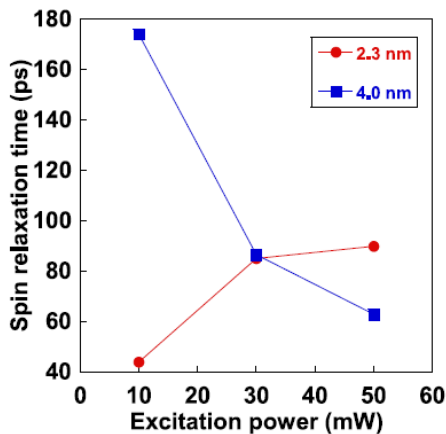


図2．タイプ II 型トンネル双量子井戸でのスピン緩和時間の励起光強度依存性

励起光強度(横軸)を上げると、バリア幅 4.0 nm のサンプルではスピン緩和時間が短くなるが (Bir-Aronov-Pikus 効果) バリア幅 2.3 nm のサンプルではスピン緩和時間は長くなる。

また、III-V 族化合物半導体のスピン緩和の知見を広げ長時間化をはかるために GaAs/AlGaAs 量子井戸のスピン緩和の井戸幅依存性、GaSb/AlSb 多重量子井戸のスピン緩和、低温成長 GaAs のスピン緩和の成長温度依存性、Be ドープ p 型 GaAs のスピン緩和のドーピング濃度依存性を調べた。特に、GaAs/AlGaAs 量子井戸では、井戸幅 1.8 nm で 400ps の長いスピン緩和時間が得られた。これらの研究成果は今後の応用上の意義が大きい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yuichi Nakamura, Lianhe Li, Takuya Kamezaki, Kizuku Yamada, Edmund Linfield, Atsushi Tackeuchi
2. 発表標題 Picosecond spin relaxation in GaSb/AlSb multiple quantum wells with a 1.55-um energy band gap
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田侑己, 中村雄一, 大橋龍太郎, 菊池哲太, 藤沼広輝, 下村哲, 竹内淳
2. 発表標題 GaAs-Al _{0.3} Ga _{0.7} As量子井戸におけるスピン緩和時間の井戸幅依存性()
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村 雄一, 松田 侑己, 藤沼広輝, 孫啓明, 金子朔夜, 中山航, 竹内淳
2. 発表標題 Excitation power dependence of spin relaxation time in GaAs/AlGaAs/AlAs type-II tunneling bi-quantum wells
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kehan Zhou, Yuichi Nakamura, Lian Ji, Shulong Lu, Atsushi Tackeuchi
2. 発表標題 Observation of optical anisotropy of GaAsSb-capped InAs quantum dots
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	中村 雄一 (Nakamura Yuichi)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
英国	University of Leeds			
中国	Suzhou Institute of Nanotech and Nanobio			