

論文内容の要旨

博士論文題目 GaAs(110)量子井戸構造における電子スピン緩和と
光デバイス応用に関する研究

氏名 揖場 聡

(論文内容の要旨)

電子の電荷自由度とスピン自由度の両者を利用する半導体スピントロニクス技術を用いた、スピントランジスタやスピン面発光半導体レーザ(VCSEL)などの革新的な半導体デバイスの実現が期待されている。これらを実現するためには、半導体中のスピンドイナミクスについて知見を得た上で、これを制御することが必須であり、電子スピン緩和時間 τ_s はその重要な指標となる。本研究では、i) 光デバイスへの応用に向けて、GaAs(110)基板上に良質な量子井戸(QW)を作製し、 τ_s を制御する技術を確立すること、ii) 室温動作スピン VCSEL を実現することを目的とした。

i) スピンデバイスを実現する上で、伝導帯電子の長い τ_s 、および、その制御が求められる。近年、GaAs(110)基板上 GaAs/AlGaAs QW において、室温で数 ns に達する長い τ_s が得られることが報告されている。また、(110) QW では、ヘテロ界面のラフネスにより τ_s が変化すること指摘されているが、これに関する系統的な実験報告はない。そこで、まず、分子線エピタキシー(MBE)法による系統的な結晶成長実験を通して、難しいとされる GaAs(110)基板上の高品質成長技術を確立した。そして、得られた最適成長条件をもとに GaAs/AlGaAs (110) QW を作製し、 τ_s と界面平坦性との相関について調べた。QW のヘテロ界面における成長中断時間を系統的に変えることにより界面平坦性の異なる試料を作製した。成長中断を 30 秒行うことにより、ヘテロ界面が平滑化し、 τ_s が 1.8 ns から 2.1 ns まで増大することを見出した。これは、ヘテロ界面の平滑化により、界面ラフネスに起因するスピン緩和を抑制したことを示している。

電子スピン緩和は、外部からの印加電場により制御可能であることが知られている。従って、室温において数 ns に達する GaAs (110) QW の非常に長い τ_s

を、印加電場を用いてスピン緩和を促進することによって、広いダイナミックレンジで変調できると期待される。しかし、従来の報告では低温における実証のみであった。そこで、GaAs/AlGaAs (110) QW における τ_s の室温電場制御を目指し、高い逆バイアス耐性を有する *p-i-n* 構造を作製した。作製したデバイスに対して逆バイアス電圧を-20 V 印加することにより、 τ_s が4.0 ns から0.3 ns まで著しく減少し、室温において印加電場により τ_s を1桁変調することに初めて成功した。

ii) スピン VCSEL においては、高い円偏光度 P_c でレーザ発振することが重要であり、そのためには、伝導帯電子のスピン偏極状態がレーザ発振中保持されることが求められる。そこで、長い τ_s を有する GaAs/AlGaAs (110) QW を活性層として利用したスピン VCSEL を設計・作製し、実用上重要な室温における光励起円偏光レーザ発振の実現を目指した。その結果、円偏光パルスを用いてスピン偏極電子を注入した VCSEL ウエハにおいて、最大円偏光度が0.96 という極めて高い P_c での室温円偏光発振に初めて成功した。

(論文審査結果の要旨)

電子の電荷とスピン状態の両者を利用する半導体スピントロニクス技術を用いた、スピントランジスタやスピン面発光半導体レーザ(VCSEL)などの革新的な半導体デバイスの実現が期待されている。これらを実現するためには、半導体中のスピンドायナミクスについて知見を得た上で、これを制御することが必須であり、電子スピン緩和時間 τ_s はその重要な指標となる。本論文では、光デバイスへの応用に向けて、GaAs(110)基板上の良質な量子井戸(QW)の作製技術、および、 τ_s の制御技術を確立すること、併せて、スピン VCSEL の室温円偏光発振を実現することを目的とした。

スピンドバイスを実現するためには、伝導帯電子の長い τ_s 、および、その制御が求められる。近年、GaAs(110)基板上 GaAs/AlGaAs QW において、室温で数 ns に達する長い τ_s が得られることが報告されている。また、(110) QW では、ヘテロ界面のラフネスにより τ_s が変化すること指摘されているが、これに関する系統的な実験報告はない。そこで、分子線エピタキシー(MBE)法による系統的な結晶成長実験を通して、難しいとされる GaAs(110)基板上の高品質成長技術を確立した上で、GaAs/AlGaAs (110) QW における τ_s と界面平坦性との相関について調べた。QW ヘテロ界面における成長中断時間を系統的に変えることにより界面平坦性の異なる試料を作製した。成長中断を 30 秒行うことにより、ヘテロ界面が平滑化し、 τ_s が 1.8 ns から 2.1 ns まで増大することを見出した。これは、ヘテロ界面の平滑化により、界面ラフネスに起因するスピン緩和を抑制したことを示している。

電子スピン緩和は、外部からの印加電場により制御可能であることが知られている。室温において数 ns に達する非常に長い τ_s を、印加電場によりスピン緩和を促進することによって、広いダイナミックレンジで変調できると期待される。しかし、従来の報告では低温における実証のみであった。そこで、GaAs/AlGaAs (110) QW における τ_s の室温電場制御を目指し、高い逆バイアス耐性を有する *p-i-n* 構造を作製した。作製したデバイスに対して逆バイアス電圧を -20 V 印加することにより、 τ_s が 4.0 ns から 0.3 ns まで減少し、室温において印加電場により τ_s を 1 桁変調することに初めて成功した。

高い円偏光度 P_c でレーザ発振するスピン VCSEL を実現するためには、伝導帯電子のスピン偏極状態がレーザ発振中保持されることが求められる。そこで、長い τ_s を有する GaAs/AlGaAs (110) QW を活性層として利用したスピン VCSEL を設計・作製し、実用上重要な室温における光励起円偏光レーザ発振の実現を目指した。その結果、作製した VCSEL ウェハにおいて、室温で最大円偏光度が 0.96 に達し、高 P_c での室温円偏光発振に初めて成功した。

以上のように、本論文では、GaAs(110) QW において、QW ヘテロ界面平坦性の制御、および印加電場による室温での τ_s の制御に成功し、GaAs(110) QW を活性層とする VCSEL において高い P_c での室温円偏光発振に成功するなど、GaAs(110) QW の長い τ_s を活用したスピンドバイスの実現に向けた、学術的に重要な実証を行った。したがって、審査委員一同は、本論文が博士(工学)の学位論文として価値あるものと認めた。